

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

TESIS DOCTORAL

**TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO PARA LA RECOMENDACIÓN DE
FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL CULTIVO MAÍZ
EN EL VALLE MEDIO DEL RÍO YARACUY DEL ESTADO YARACUY**

Autor: MSc. Aymara A. Sánchez

Maracay, febrero 2014

Trabajo de Grado como requisito para optar al Título de
Doctor en Ciencias Agrícolas

Comité Asesor

Dr. Rodolfo Delgado
Tutor

Dra. Carmen Rivero
Asesor

Dr. Vianel Rodríguez
Asesor

A la memoria de mi Padre y el Dr. Casanova

*A mi madre Luisa
A mis hijos Luis Enrique, Luis Gerardo y María Patricia
y a mi esposo Duilio, los amo.*

AGRADECIMIENTO

Esta tesis doctoral, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte de la autora, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré:

A Dios, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte durante todo el periodo de estudio.

Al Dr. Rodolfo Delgado, por toda su asesoría y valiosa sugerencia que han contribuido de forma significativa a mejorar esta tesis.

A la Dra. Carmen Rivero y a el Dr. Vianel Rodríguez, miembros del Comité Asesor, por su colaboración prestada.

A la Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado” (UCLA) por la oportunidad de continuar mi formación profesional y CDCHT por el financiamiento del proyecto de tesis.

Al Personal de la Unidad de Investigación de Suelo y Nutrición Mineral de Planta del Decanato de Agronomía de la UCLA. Especialmente a Carlos Colmenares y Francisco Castañeda por el apoyo brindado en Campo y en el Laboratorio.

Al personal técnico de Campo, en especial al Técnico Argenis Rivero por la colaboración y ayuda prestada, durante los tres años de desarrollo del experimento y al Personal del Laboratorio de Suelos y Agua de la Estación Experimental Yaritagua, del INIA, por los análisis foliares.

A mi madre, hijos y sobrinos en especial a Jesús Eduardo por su apoyo incondicional y por mostrarme que siempre están ahí para lo que sea.

A mi esposo, por estar incondicionalmente siempre a mi lado, animándome a continuar, por toda su ayuda y, principalmente, por hacerme feliz.

TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO PARA LA RECOMENDACIÓN DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL CULTIVO MAÍZ EN EL VALLE MEDIO DEL RÍO YARACUY, ESTADO YARACUY

RESUMEN

La mayoría de los suelos venezolanos presentan problemas de degradación y bajo contenido de nitrógeno disponible. En el valle medio del Río Yaracuy, estado Yaracuy, así como en el resto del país, es necesaria la fertilización con N para cubrir los requerimientos del maíz, y normalmente se basa en estudios de respuesta a la aplicación de dosis crecientes del elemento realizados hace años, con diferentes condiciones de suelo y cultivares. Normalmente la estimación de las dosis de N se realiza sin consideración de parámetros de disponibilidad del elemento en el suelo. En esta investigación se propuso la evaluación de técnicas de diagnóstico de la disponibilidad de N y recomendación de dosis de N, que incluyen: 1) índices de disponibilidad de N en el suelo, mediante la evaluación de la concentración del N mineral extraíble en KCl 2M al momento de la siembra y en la etapa V5-V6 a los 25-30 días luego de la siembra, 2) un método basado en el verdor de las hojas mediante el uso del clorofilómetro (SPAD) en las etapas V5-V6, V10-V11 y floración (R1), 3) un programa basado en el conocimiento de expertos para la fertilización nitrogenada del maíz, y 4) un modelo de simulación basado en las principales características del suelo, cultivo, clima y manejo, y su empleo en la determinación de la recomendación de la fertilización nitrogenada en el cultivo del maíz en el valle medio del Río Yaracuy, estado Yaracuy. Se condujeron experimentos en la Estación Experimental Yaritagua, INIA, localidad Yaritagua, municipio Peña, estado Yaracuy de Venezuela. El primer año del estudio se creó un gradiente de disponibilidad de N en el suelo mediante la aplicación de 0, 150, 300 y 450 kg N ha⁻¹ en forma de Urea, antes de la siembra, según un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones por tratamiento, y en el segundo año del estudio, se evaluó la respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N (0, 45, 95, 120, 160, y 240 kg N ha⁻¹), de acuerdo con un arreglo de tratamiento en parcelas divididas con tres repeticiones. Los datos se procesaron mediante análisis de varianza usando los procedimientos de ANOVA y NLIN, pruebas de correlación de Pearson y regresión. El nivel crítico de N mineral al momento de la siembra fue de 45,8; 31,3 y 28,0 mg kg⁻¹ para las profundidades 0-10, 0-20 y 0-40 cm; mientras que los niveles críticos de la concentración del elemento medido en la etapa V5-V6 fluctuaron desde 69,3 a 60,8 mg kg⁻¹ a los 0-10 y 0-20 cm de profundidad, respectivamente. La relación encontrada entre el contenido de N mineral en el suelo y un porcentaje de rendimiento máximo, permitió proponer rangos de interpretación de la disponibilidad de N para estimar la dosis de acuerdo con las profundidades de muestreo del N mineral disponible. En relación a la evaluación del

clorofilómetro como técnica para la estimación del estado nutricional del maíz y determinación de dosis de N, se detectó que las lecturas SPAD y concentración de N en hoja son sensibles a la variación en la cantidad de N aplicado (dosis de N) en diferentes etapas de crecimiento del cultivo. Las lecturas SPAD y contenido de N en hoja se correlacionaron positiva y significativamente a partir de la etapa V10 con el rendimiento del cultivo. Los resultados obtenidos en este experimento revelan que el Clorofilómetro puede ser usado para detectar en campo, deficiencias de N en el cultivo de maíz a partir de la etapa V5-V6 y V10-11 de acuerdo a los niveles críticos y rango de lecturas de SPAD establecidas con base en la probabilidad de respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada. Además, mediante la integración de las lecturas SPAD en el periodo V5-V6 y los contenidos de N mineral se propone un índice para determinar la dosis óptima de N en el reabono. El programa NuMaSS estimó dosis de N razonables para el maíz, las cuales decrecieron en la medida que la disponibilidad del N incrementó en el suelo asociado a la aplicación de dosis crecientes en el primer año. La estimación del N disponible en el suelo mediante el N extraído por el cultivo sin fertilizar fue la mejor opción para la estimación de la dosis de N; mientras que la estimación basada en la mineralización de la materia orgánica sobreestimó la dosis de N. La dosis estimada por el NuMASS resultó sensible a la cantidad de materia seca, concentración de N en rastrojo y grano, y a la eficiencia de uso de N aplicado como fertilizante. En relación al modelo INIA, fue posible la calibración mediante el ajuste de los parámetros asociados a la absorción del N desde el suelo, a la concentración de N mineral mínima en el suelo, por debajo del cual no ocurre absorción, y al parámetro que regula la cantidad de agua requerida para la síntesis diaria de materia seca. Las dosis de N estimadas por el modelo INIA decrecieron en la medida que el N mineral del suelo se incrementó, algo similar a lo observado para las dosis óptimas de los estudios de campo y estuvieron en el mismo orden de magnitud, y en algunos casos fueron estadísticamente similares a las observadas.

Palabras clave: N mineral, clorofilómetro, NuMaSS, modelo INIA, dosis estimada.

METHODS TO PREDICT N FERTILIZERS DOSE FOR MAIZE GROWN IN THE VALLEY OF THE YARACUY RIVER, YARACUY STATE, VENEZUELA

ABSTRACT

Most venezuelan soils show problems associated to soil degradation and low N availability. In the medium valley of the Yaracuy river, and all around the country, N dose are required for maize, and normally they are estimated from crop response to N application in experiments carried out some years ago for different conditions and cultivars. To estimate N dose for maize none of the soil parameters associated to N availability are taken in account. In this study we evaluated some methods to diagnostic soil N availability and N dose required: 1) Soil N availability extracted by KCl (2M) at the sowing time and a the V5-V6 stage (25-30 days after sowing time), 2) use of a clorofilometer (SPAD reading) measured a the V5-V6, V10-V11, and R1 crop stage, 3) the NuMASS program which is an expert system support for N, P, and lime dose recommendations, and 4) a simulation model named INIA which is based in the principal soil, crop, weather and management characteristics, for N dose recommendations for maize grown in the medium valley of the Yaracuy river, Yaracuy state. To evaluate these methods, some experiments were carried out in the Experimental Station of Yaritagua (INIA), located in the Rodeo area, in Yaracuy state of Venezuela, firstly (1^{er} year of the study, 2009) a N availability gradient was created by application of 0, 150, 300 and 450 kg N ha⁻¹ as Urea, in a completed randomized block design with 4 replications, and the crop response to 0, 45, 95, 120, 160, and 240 kg N ha⁻¹ in the 2nd year of the study (2010), in a split plot design with 3 replications. The regression analysis, ANOVA, mean comparisons, was carried out by SAS. The critical concentration of mineral N at the sowing time was 45.8, 31.3 and 28.0 mg kg⁻¹ for the 0-10, 0-20 and 0-40 cm soil depths, while these were from 69.3 to 60.8 mg kg⁻¹ for the depths 0-10 y 0-20 cm at the V5-V6 crop stage. The significant relationship found between soils mineral N and maximum yield let us to propose ranks of N availability to estimate N dose for N availability measured at different soil depths. Using clorophilometer to evaluate the status of N in the crop, and to estimate N dose, we found that the SPAD lectures and the N concentration in leaf are sensitive to the dose of N applied in different crop stages. In addition, the SPAD lectures and N concentration were correlated with the yield of the crop in the different crop stages. The results show that the clorophilometer could be used to detect N deficits at the field scale at the V5-V6 and V10-V11 crop stages. Moreover, it was possible to determine SPAD critical lectures and ranks, associated to crop response to N application, so we propose a procedure to determine N dose in

accordance to the crop stage. In addition to this, we propose an index to estimate N dose for sidedressing using the mineral N concentration and the SPAD lecture at the V5-V6 stage. The NuMaSS program is an easy to handle system, and it was able to estimate N doses close to the observed ones, which decreased while the soil N availability increased due to the N dose applied in the first year. The estimation of soil N availability by using the N extracted by the crop without fertilizer was the best option to estimate the N dose, while the estimation of the soil N availability based in the mineralization of the soil organic matter overestimated the N dose. Moreover, the N dose estimated by NuMaSS showed to be sensitive to the amount of dry matter and N concentration in dry matter and grain, and to the efficiency of utilization of the N applied as fertilizer. About the INIA model, it was possible to calibrate the model to the Yaritagua area, by fitting the parameters associated to the absorption of N from the soil, which is the minimum mineral N concentration below which the N is not absorbed by the crop from the soil, and the parameter which is a conversion parameter associated to the amount of water required to produce a unit of dry matter. The N dose simulated by the INIA model decreases like the mineral N increase, it was observed in the field that the optimal N dose decrease when the mineral N increase and are in similar magnitude and in some cases statistically similar than observed ones.

Keywords: N mineral, chlorophyllometer, NuMaSS, INIA model, estimated dose.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS.	xviii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO I:	
PROBLEMÁTICA DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA DEL MAÍZ, EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DEL VALLE MEDIO DEL RÍO YARACUY, ESTADO YARACUY	
1. Introducción.....	4
2. Problemática de la fertilización nitrogenada en el estado Yaracuy.....	5
3. Criterios de recomendación de la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz en Venezuela.....	6
4. Propuesta para el manejo de la fertilización nitrogenada en el valle medio del Río Yaracuy, estado Yaracuy.....	8
CAPÍTULO II:	
CONTENIDO DE NITRÓGENO MINERAL (N-NO₃⁻ Y N-NH₄⁺) EN EL SUELO PARA PREDECIR LA RESPUESTA DEL MAÍZ A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA	
I. INTRODUCCIÓN.....	10

II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
1. Índices de disponibilidad de N.....	13
1.1. N Mineral en el suelo en pre-siembra.....	13
1.2. El N mineral en el suelo en pre-aplicación en la etapa vegetativa del cultivo.....	14
2. Criterio basado en el N disponible para establecer la dosis de nitrógeno.....	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
1. Ubicación geográfica del área experimental.....	17
2. Características generales de la zona de estudio.....	17
3. Evaluación del impacto de los contenidos de N inorgánico del suelo en la nutrición del cultivo y determinación de dosis de N.....	19
3.1. Creación del gradiente de nitrógeno en el suelo.....	19
3.2. Evaluación de la respuesta del maíz a la aplicación de dosis de N y su relación con los índices de planta y suelo.....	20
3.2.1. Determinación de las características físicas y química del suelo.....	22
3.2.2. Evaluación del rendimiento del maíz.....	23
3.2.3. Determinación del nitrógeno inorgánico en suelo.....	24
3.3. Determinación del nivel crítico de N mineral para la predicción de la respuesta del maíz a la aplicación de fertilizante nitrogenado.....	26
4. Análisis Estadístico.....	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
1. Evaluación de los contenidos de $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$ y N mineral inicial en el suelo previo a las siembra del maíz.....	29
1.1. Relación entre el rendimiento de maíz y la concentración de nitrógeno inorgánico en el suelo.....	32
1.2. Respuesta del maíz al contenido de N mineral en el suelo.....	35
1.3. Dosis máxima y disponibilidad de N en el suelo.....	38
1.4. Estimación de la Dosis de N.....	42
2. Contenidos de N inorgánico en el suelo en la fase de cinco y seis hojas	

del cultivo y respuesta del maíz (% Rendimiento máximo) a la aplicación de N.....	44
2.1. Rendimiento en grano del maíz y la disponibilidad de N en el suelo en la fase V5-V6 del maíz.....	49
2.2. Estimación de la Dosis de N en la fase V5-V6 del maíz.	53
V. CONCLUSIONES.....	55
APÉNDICE.....	56

CAPÍTULO III:

USO DEL CLOROFILÓMETRO EN EL DIAGNÓSTICO Y ESTIMACIÓN DE LA NECESIDAD DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ

I. INTRODUCCIÓN.....	60
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	63
1. Medidor indirecto de clorofila.....	64
2. Uso del Clorofilómetro en el diagnóstico y predicción de la necesidad de fertilización nitrogenada.....	66
III. MATERIALES Y METODOS.....	69
1. Características del clima y suelo del área experimental.....	69
2. Evaluación de la respuesta del maíz a la aplicación de N y su relación con índices de planta y suelo	69
2.1. Determinación de las lecturas del clorofilómetro (SPAD) y la concentración de N foliar	70
2.2. Determinación del contenido de N mineral del suelo.....	71
3. Interpretación de las lecturas del SPAD.....	72
4. Estimación de la dosis de N.....	73
5. Análisis Estadístico.....	73
IV. RESULTADOS Y DISCUSION.....	74
1. Respuesta del maíz a la aplicación de N y su relación con lecturas	

SPAD y concentración de N en hoja.....	74
1.1. Relación entre Lecturas de SPAD, Contenido de N en la hoja y rendimiento del cultivo.....	76
2. Relación entre las Lecturas de SPAD y N foliar con la dosis del N más el N disponible en el suelo.....	80
3. Utilidad del clorofilómetro como instrumento indicativo de la necesidad de fertilización nitrogenada.....	84
2.1. Interpretación de las Lecturas de SPAD.....	86
2.2 Rangos de lecturas SPAD en función a la categorización de la respuesta del cultivo.....	88
2.3. Estimación de la Dosis de N.....	90
V. CONCLUSIONES.....	96
APÉNDICE.....	97

CAPÍTULO IV

PREDICCIÓN DE LA DOSIS DE N MEDIANTE EL SISTEMA EXPERTO NuMaSS PARA EL MAIZ EN LA LOCALIDAD DE YARITAGUA, ESTADO YARACUY

I. INTRODUCCIÓN.....	98
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	101
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	105
1. Descripción del Sistema Experto de Manejo de Nutrientes (NuMaSS) para las recomendaciones de fertilización nitrogenada.....	105
1.1. Módulo de Nitrógeno.....	105
1.1.1. Diagnóstico.....	106
1.1.1.1 Determinación del N requerido por el cultivo.....	106
1.1.1.2 Determinación del N disponible para el cultivo.....	107
1.1.2. Predicción.....	109
1.1.3. Determinación de la necesidad del fertilizante nitrogenado a	

recomendar.....	109
1.1.4. Resultados.....	110
2. Determinación del requerimiento de N por el NuNaSS en la localidad de Yaritagua, Edo. Yzacuy.....	110
2.1. Coeficientes del cultivo	111
2.2. Parámetros del suelo.....	112
2.3. Manejo Previo.....	112
3. Validación del NuMaSS.....	112
4. Análisis de Sensibilidad del NuMaSS.....	114
5. Análisis Estadísticos.....	114
IV RESULTADOS Y DISCUSION.....	115
1. Respuesta del maíz a la aplicación de N y estimación de dosis de N máxima.....	115
2. Predicción de dosis de nitrógeno por NuMaSS y su relación con las dosis obtenidas del estudio de respuesta a dosis crecientes de N.....	115
2.1. Estimación de la disponibilidad del elemento en el suelo, en función del N absorbido por el cultivo sin fertilizar y dosis generada por el NuMaSS.....	117
2.2. Estimación del N disponible para el cultivo en función del contenido de materia orgánica en el suelo y dosis de N generada por el NuMaSS..	121
3. Relación entre las dosis de N generadas por el NuMaSS y las obtenidas del estudio de respuesta a dosis crecientes de N.....	122
4. Análisis de Sensibilidad.....	127
V. CONCLUSIONES.....	131
APÉNDICES.....	132

CAPÍTULO V

DETERMINACIÓN DE DOSIS DE N PARA MAÍZ EMPLEANDO EL MODELO INIA EN LA LOCALIDAD DE YARITAGUA, DEL VALLE MEDIO, ESTADO YARACUY

I. INTRODUCCIÓN.....	135
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	138
1. Modelos de Simulación Agronómicos.....	138
2. Descripción del modelo INIA y aspectos relevantes asociados a la determinación de la dosis de N.....	139
2.1 Estimación del N disponible en el suelo.....	139
2.2 Disponibilidad de agua en el suelo.....	142
2.3 Estimación de la cantidad diaria de nitrógeno absorbida por el cultivo..	146
2.4 Estimación de producción de Biomasa aérea y producción de Grano.....	146
2.5 Estimación de requerimiento o dosis de N.....	150
III MATERIALES Y METODOS.....	152
1. Determinación de las dosis de N requerida por el maíz, en condiciones variables de disponibilidad de N mineral inicial en el suelo a nivel de campo.....	152
2. Evaluación de la capacidad del modelo INIA para la estimación de la dosis de N.....	152
a. Calibración y Validación del modelo INIA para la predicción del rendimiento del cultivo.....	152
b. Estimación de dosis de N requeridas utilizando el modelo INIA.....	154
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	158
1. Respuesta del maíz a la aplicación de N y estimación de dosis de N máximo.....	158
2. Calibración y validación del modelo INIA.....	158
3. Estimación de dosis de N mediante el modelo INIA.....	161
IV. CONCLUSIONES.....	166
APÉNDICE.....	167
CONCLUSIONES GENERALES.....	168
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	169

ÍNDICE DE TABLAS

Nº		Pág.
CAPÍTULO II		
1	Características físico-químicas del suelo donde se realizó el estudio.....	24
2	Probabilidad de respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada en función de la disponibilidad de N en el suelo en diferentes profundidades..	43
3	Probabilidad de respuesta del maíz en la etapa V5-V6 a la fertilización nitrogenada en función de la disponibilidad de N como contenidos de N-NO ₃ ⁻ y N mineral a diferentes profundidad del suelo mas dosis (2/3) de N.....	54
CAPÍTULO III		
4	Medias de lecturas SPAD, contenido de N y rendimiento, considerando tres etapas del cultivo de maíz, en función del gradiente de N (1 ^{er} año) y las dosis de N aplicadas en el 2 ^{do} año del experimento	75
5	Lecturas de SPAD máximas y críticas en hojas de acuerdo a la relación entre las lecturas SPAD y el N disponible, en las fases de 5-6, 10-11 hojas y en floración de maíz.....	86
6	Concentraciones críticas de N foliar de acuerdo a la relación entre el contenido de N foliar y lecturas de SPAD críticas en la fase V5-V6, V10-V11 y R1 del maíz.....	87
7	Probabilidad de respuesta del maíz en la etapa V5-V6 a la fertilización nitrogenada en función de las lecturas de SPAD en diferentes etapas fenológicas de cultivo.....	89
8	Probabilidad de respuesta del maíz en la etapa V5-V6 a la fertilización nitrogenada en función del índice (Lecturas de SPAD * N disponible) a diferentes profundidades.....	95
CAPÍTULO IV		
9	Variables requeridas en el diagnóstico y predicción por el sistema NuMaSS para estimar el requerimiento de N para el maíz.....	108
10	Parámetros de suelo y cultivo de maíz ingresados al NuMaSS en la localidad de Yaritagua del valle medio del Río Yaracuy.....	113
11	Predicción del N requerido como fertilizante nitrogenado, en función del requerimiento de N del cultivo y el disponible para el cultivo con base al	

	N absorbido por el cultivo sin fertilizar en condiciones variables de N inicial del suelo, según Método 1 del NuMaSS.....	119
12	Resultados del Diagnóstico por el NuMaSS.....	120
13	Resumen de la predicción para Nitrógeno por el NuMaSS.....	121
14	Requerimiento del cultivo, N disponible en suelo y N requerido como fertilizante estimado por el Método 4 del programa NuMaSS, el cual estima el N suelo con base en la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo.....	123
CAPÍTULO V		
15	Parámetros de suelo requeridos por el modelo INIA.....	155
16	Parámetros de cultivo en la Localidad de Yaritagua del valle medio del Río Yaracuy.....	157

ÍNDICE DE FIGURAS

N°		Pág.
	CAPÍTULO II	
1	Vista aérea de la Estación Local Yaritagua INIA Yaracuy y área del ensayo. Fuente programa Google Earth, 2009.....	17
2	Precipitación y temperatura media mensual durante el ciclo del cultivo A partir de la fecha de siembra: 15 de julio del 2010.....	18
3	Esquema representativo del diseño de experimento, se ilustran las parcelas principales (Primer año) y las subparcelas (Segundo año).....	21
4	Contenido de nitratos y amonio inicial en el perfil del suelo, asociado a los contenidos variables de N.....	29
5	N Mineral inicial en el perfil del suelo asociado a los contenidos variables de N.....	31
6	Relación entre rendimiento de maíz en los tratamientos con 0 kg N ha ⁻¹ y contenidos de N-NO ₃ ⁻ , N-NH ₄ ⁺ a diferentes profundidad muestreo.....	33
7	Relación entre rendimiento de maíz en los tratamientos con 0 kg N ha ⁻¹ y la concentración de N mineral inicial a diferentes profundidades de muestreo.....	34
8	Relación entre rendimiento relativo para los tratamientos con 0 kg N ha ⁻¹ y la concentración de N mineral inicial del suelo a diferentes profundidades del suelo.....	36
9	Relación entre el Porcentaje de Rendimiento Máximo del maíz y las dosis de N más N mineral del suelo previo a la siembra, ajustado por el modelo de regresión cuadrática.....	39
10	Relación entre el Porcentaje de Rendimiento Máximo del maíz y las dosis de N más N mineral del suelo previo a la siembra ajustado con el modelo cuadrático-meseta.....	40
11	Rendimiento del maíz en función a las concentraciones de N inorgánico en el suelo en la fase V5-V6 del cultivo.....	46
12	Relación el porcentaje de rendimiento máximo y la concentración de N mineral en las capa 0-10, 0-20 y 0-40 cm en la fase de V5-V6 del maíz	47
13	Relación entre el porcentaje de rendimiento máximo del maíz y el N disponible (2/3) de la dosis de N más N-NO ₃ ⁻) en la etapa V5-V6 del cultivo.....	50
14	Relación entre el porcentaje de rendimiento máximo del maíz y el N	

disponible ($2/3$ de la dosis de N más Nmin del suelo) en la etapa V5-V6 del maíz.....	51
-------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO III

15 Esquema de muestreo y toma de lecturas SPAD en hojas de maíz.....	70
16 Relación entre las lecturas SPAD, contenido de N y rendimiento del cultivo, en las etapas de desarrollo V5-V6, V10-V11 y floración en el híbrido de maíz DK 357.....	77
17 Relación entre rendimiento del cultivo y la concentración de N, en las etapas de desarrollo V5-V6, V10-V11 y floración en el híbrido de maíz DK 357.....	79
18 Relación entre lecturas de SPAD en hojas totalmente expandidas de maíz en la fase V5-V6 y V10-V11 y el N disponible en suelo acumulado a 0-10, 0-20 y 0-40 cm.....	81
19 Relación entre lecturas de SPAD en hoja de maíz en la etapa de floración (R1) y el N disponible (Dosis de N más el N mineral inicial) en suelo acumulado a 0-10, 0-20 y 0-40 cm.....	83
20 Relación entre Concentración de N en hojas de maíz en la fase V5-V6 y V10-V11 y el N disponible (Dosis de N más el N mineral inicial) en suelo acumulado a 0-10, 0-20 y 0-40 cm.....	84
21 Relación entre concentración de N en hoja de maíz en la etapa de floración (R1) y el N disponible (Dosis de N más el N mineral inicial) en suelo acumulado a 0-10, 0-20 y 0-40 cm.....	85
22 Porcentaje de Rendimiento máximo en maíz en respuesta al N disponible (Dosis N más el N mineral inicial) del suelo a los 0-20 cm de profundidad.....	88
23 Relación entre el Porcentaje de rendimiento máximo del maíz y el N disponible (Dosis $2/3$ + $N_{min_{V5-V6}}$) para las profundidades de 0-10, 0-20 y 0-40 cm.....	91
24 Relación entre Porcentaje de Rendimiento máximo y las lecturas SPAD en la etapa V5-V6.....	93
25 Relación entre porcentaje de rendimiento máximo y el índice de SPAD*ND (Dosis $2/3$ + $N_{min_{V5-V6}}$) para las profundidades 0-10, 0-20 y 0-40 cm.....	94

CAPÍTULO IV

26 Secciones principales que conforman el módulo de nitrógeno del programa NuMaSS para maíz.....	106
--------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

27	Respuesta del maíz a la aplicación de 0, 40, 95, 120, 160 y 240 kg N ha ⁻¹ en las diferentes parcelas donde previamente (1 ^{er} año del estudio) se aplicaron dosis crecientes del elemento.....	116
28	Relación entre la dosis de N predicha por el NuMaSS y dosis observadas obtenida de la respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes del elemento.....	124
29	Dosis de N simuladas por Sistema Experto NuMaSS y dosis de N observadas.....	126
30	Análisis de sensibilidad de las variables que modifican la estimación de la dosis.....	129
31	Análisis de sensibilidad para la eficiencia de usos del fertilizante.....	130

CAPITULO V

32	Factores y procesos considerados en la determinación de N disponible en el suelo Fuente: Delgado y Núñez (2005).....	141
33	Tasa de mineralización relativa promedio a través del perfil del suelo (factorMR).....	142
34	Actividad microbiana relativa en función del espacio poroso total ocupado por agua. Fuente: Linn y Doran (1984).....	144
35	Relación Carbono:Nitrógeno en maíz en la condición sin limitación y con limitación de N.....	148
36	Respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N en condición de contenidos variables de N mineral inicial ponderado entre 0 y 40 cm de profundidad: A) 17,75 mg N kg ⁻¹ , B) 31,19 mg N kg ⁻¹ , C) 34,21 mg N kg ⁻¹ y D) 34,64 mg N kg ⁻¹	159
37	Relación entre rendimiento observado y simulado en las parcelas sin aplicación de N utilizadas para calibración del modelo.....	160
38	Relación entre el rendimiento observado y simulado en los tratamientos fertilizados desde 40 hasta 240 kg ha ⁻¹	160
39	Relación entre el Rendimiento observado y simulados en la calibración del modelo utilizando la dosis de 40 kg N ha ⁻¹	161
40	Relación entre la dosis de N simulada por el modelo INIA y la dosis de N máxima obtenida de la respuesta del maíz a la aplicación de dosis variables del elemento.....	162
41	Relación entre el contenido promedio ponderado de N mineral inicial en la capa 0-10 (a), 0-20 (b) y 0-40 cm (c) con la dosis de N estimada por el modelo INIA (Dosis-INIA) y con la dosis de N estimada (Dosis-respuesta) de los estudios de respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N.....	164

42 Dosis de N simuladas por el modelo INIA y dosis de N observadas..... 165

INTRODUCCIÓN GENERAL

En Venezuela el maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante del sector agrícola vegetal y ha sido considerado como un rubro estratégico por su incidencia en la alimentación diaria de los venezolanos, con aporte proteico de 6,5 gramos persona día⁻¹ (Segovia y Alfaro, 2009).

La producción nacional se concentra principalmente en la región de los Llanos Occidentales (Portuguesa, Barinas y parte de Cojedes) con un 47%, en los Llanos Centrales (Guárico) con 27% y Yaracuy con un 6%, lo que significa que más del 80% del total de la producción comercial se agrupa en tres áreas agroecológicas bien definidas (Monasterio *et al.*, 2010).

Con respecto a la producción del maíz, para el 2009, fue 2.281.931 Megagramos (Mg), obtenida en 771.086 ha. De acuerdo con estos datos, el rendimiento en grano promedio se ubicó en 2.959 kg ha⁻¹. Para el año 2011, la producción del cultivo alcanzó 1.305.150 Mg, que representó una reducción de 23,6% con respecto a la cosecha del 2009 y 2010 (Mosquera, 2012). Para el valle medio del Río Yaracuy, la producción del maíz, según Censo Agrícola del 2007 (MAT, 2010), se ubicó en 109.134 Mg, obtenidas en una superficie cosechada de 32.201,34 ha; los municipios Bruzual, Peña, Páez y Urachiche, generaron el 95% de la producción del estado Yaracuy.

Estas cifras muestran la baja producción que ha venido experimentando este rubro y que continúa siendo deficitaria con respecto a la demanda creciente del país, situación que puede ser atribuida a factores de clima y de suelo. El deterioro de las condiciones físicas y químicas de los suelos, está asociada con un bajo nivel de materia orgánica y con un manejo inadecuado de la fertilización (dosis, localización del nutrimento y momento de aplicación).

El nitrógeno (N) considerado el nutrimento más importante para la producción vegetal debido a las cantidades requeridas por las plantas, es el que con más frecuencia limita el crecimiento y el rendimiento de los cultivos y en especial del maíz. Es por ello que es necesario disponer de técnicas apropiadas que permitan la

determinación de la cantidad de N requerido por el cultivo y del fertilizante nitrogenado a recomendar.

En el país se dispone de sistema de recomendación de fertilizantes, que presenta algunas limitaciones para ser utilizada como base de una agricultura sustentable, en la cual se requiere recomendar dosis de fertilizantes que consideren las condiciones propias de suelo, clima, manejo de las unidades de producción, y las condiciones socio-económicas de los productores (Delgado y Salas, 2006). Sin embargo, en los últimos años, se han desarrollado distintas técnicas de diagnóstico y recomendación, entre las que se puede mencionar el análisis de N inorgánico en el suelo, medidores espectrales, sistemas expertos y modelos de simulación que contribuyen a definir con mayor precisión la dosis de N para los cultivos de manera más sustentable.

Con base en este planteamiento, en el presente trabajo se propuso como objetivo general: Evaluar técnicas de diagnóstico para recomendación de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en el valle medio del Río Yaracuy, Estado Yaracuy.

Objetivos Específicos:

1. Valorar la efectividad del contenido de N mineral (NO_3^- y NH_4^+) en el suelo, previo a la siembra y al momento del estado vegetativo (V5-V6), en la predicción de la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada.
2. Valorar la utilidad del clorofilómetro en la estimación del contenido foliar de N en el cultivo y como instrumento indicativo de la necesidad de fertilización nitrogenada durante la etapa vegetativa del cultivo.
3. Validar el programa computarizado NuMass en las condiciones edafoclimáticas locales, como sistema de recomendación de la fertilización nitrogenada.
4. Validar el modelo de simulación INIA como sistema de recomendación de la fertilización nitrogenada.

La presente investigación se estructuró en capítulos en los que se desarrollaron los objetivos específicos:

Capítulo I: describe la problemática de la fertilización nitrogenada en maíz en los sistemas de producción agrícola del valle medio del río Yaracuy y pertinencia del presente estudio.

Capítulo II: incluye la evaluación del contenido de nitrógeno mineral (N-NO_3^- y N-NH_4^+) en el suelo en la predicción de la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada.

Capítulo III: describe la utilidad del clorofilómetro en el diagnóstico y estimación de la necesidad de fertilización nitrogenada en maíz en la etapa vegetativa del cultivo.

Capítulo IV: presenta la validación del sistema experto NuMaSS en la predicción de las dosis de N para el maíz en la localidad de Yaritagua, estado Yaracuy

Capítulo V: presenta la validación del Modelo INIA en la determinación de dosis de N para maíz en la localidad de Yaritagua, estado Yaracuy.

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA DEL MAÍZ, EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DEL VALLE MEDIO DEL RÍO YARACUY, ESTADO YARACUY

1. Introducción

En general, la producción del cultivo presenta múltiples problemas derivados de la siembra en zonas agroecológicas con marcada diferencias en cuanto a regímenes pluviométricos, altitud y características físicas y químicas de los suelos (Monasterio *et al.*, 2008). El clima es uno de los factores determinantes para su rendimiento, debido a que la mayor superficie sembrada se hace bajo condiciones de secano (Torín, 2007; Monasterio, 2008). Los problemas edáficos están relacionados con déficit de humedad en las posiciones topográficas altas y exceso de aguas superficiales en las posiciones bajas, con alto contenido de arcilla y arena muy fina que provocan baja permeabilidad y problemas de drenaje interno y externo, principalmente en los Llanos Occidentales. Además presentan problemas de erosión, pérdida de nutrientes por la erosión hídrica y fuerte escorrentía de las aguas de lluvia y por la acidez de los suelos, principalmente en la región Central, que aunado a los sistemas de manejo aplicados han originado un descenso del contenido de materia orgánica del suelo (Medina y Ramírez, 1997; Meléndez *et al.*, 2001; Rivero y Torres, 2010).

La zona del valle medio del Río Yaracuy en el estado Yaracuy, se caracteriza por la presencia de suelos susceptibles a la erosión hídrica, lo que asociado al uso de labranza tradicional y a las condiciones climáticas del área han favorecido la destrucción de la materia orgánica y deterioro de las condiciones físicas y químicas de dichos suelos, también ha ocasionado descenso en la suplencia de nutrientes para los cultivos (Pla, 1994; Abreu, 1996; Ohep, 1999). Esta confluencia de factores ha

producido una disminución en la calidad y productividad de estos suelos y por lo tanto, en su calidad (Ohep y Florentino, 2001).

Un componente importante a destacar en esta problemática, con respecto a las condiciones climáticas, es la cantidad de lluvia caída durante la etapa de prefloración hasta llenado de grano, por cuanto ello afecta significativamente el rendimiento del maíz en esta zona (Monasterio *et al.*, 2008).

2. Problemática de la fertilización nitrogenada en el estado Yaracuy

A partir de 1980, se desarrollaron múltiples investigaciones sobre labranza del suelo, combinado con dosis, fuentes y formas de aplicación del nitrógeno, debido a que los productores aplicaban fertilización nitrogenada con dosis constantes y Urea como fuente nitrogenada. Con base en este planteamiento, Marcano *et al.* (1994) evaluaron niveles de nitrógeno aplicados al suelo con diferentes tipos de labranza (arado de vertedera más rastra, rastra pesada más rastra y sólo rastra) en un suelo Oxic Haplustalfs del valle medio. No hubo efecto de labranza en rendimiento de grano de maíz, pero sí con las dosis de nitrógeno empleadas; las dosis de 200 y 250 kg N ha⁻¹ generaron los mayores rendimientos.

Marcano y Ohep (1997) utilizaron las mismas prácticas de labranza señaladas y evaluaron dos fuentes de nitrógeno (urea y sulfato de amonio) y tres formas de aplicación del nitrógeno. Los resultados mostraron que la preparación profunda del suelo indujo un mejor aprovechamiento del nitrógeno por la planta de maíz, medida a través de la respuesta de los componentes del rendimiento, aunque los autores destacan que las precipitaciones tuvieron un efecto determinante en el rendimiento de grano.

La localidad de “Las Velas”, municipio Peña, además de los problemas de degradación de suelos detectados, presenta suelos ácidos con problemas de aluminio intercambiable. Marcano *et al.* (1999) evaluaron aplicaciones de enmiendas y fertilizantes químicos para corregir el estatus nutricional del suelo, en un Ultisol de textura franco arenosa. Las enmiendas cal dolomítica y fosfoyeso utilizadas influyeron favorablemente en la retención de humedad y en el rendimiento en grano

del maíz, mientras que los niveles de nutrimentos aplicados no afectaron el rendimiento, lo cual fue atribuido por los autores al estrés hídrico ocurrido durante el ciclo del cultivo.

En la misma localidad y suelos, Sánchez *et al.* (2008) estudiaron la aplicación de nitrógeno y fertilización con fósforo y potasio con base en el criterio de recomendación de suficiencia, que busca mejorar el nivel del elemento disponible en el suelo. El rendimiento de maíz no fue afectado por las dosis de fertilización con P y K, lo que demostró un suministro apropiado de estos elementos por parte del suelo, así mismo, la evaluación de la interacción N con aplicaciones de P y K mostró un aumento en el rendimiento de grano sólo cuando se incrementó el nivel de N y no se aplicó fertilización con P y K.

El diagnóstico de la fertilidad de los suelos agrícolas en el estado Yaracuy, realizado a través de resultados de los análisis de suelo de rutina, durante el período 2003 a 2009, indicó que las principales limitantes del suelo para los cultivos en algunos municipios fueron el bajo contenido de materia orgánica y la poca disponibilidad de fósforo, lo que amerita planes de fertilización y aplicaciones de enmiendas correctivas (Andrade *et al.*, 2012).

Los estudios presentados, muestran que diferentes factores como: déficit de agua durante el ciclo del cultivo, características de los suelos tal como pH, bajo contenido de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes y clima de la región, afectan la absorción del nitrógeno por el cultivo y la eficiencia de utilización de las fuentes nitrogenadas, los cuales deben ser considerados para evaluar mecanismos o técnicas para diagnosticar y suplementar al cultivo con los nutrientes necesarios.

3. Criterios para recomendación de la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz en Venezuela

La aplicación de cantidades adecuadas de los nutrientes requeridos por el cultivo de maíz es un aspecto clave en el incremento de la producción y productividad del cultivo, especialmente el nitrógeno, por la alta demanda de este nutriente, por su comportamiento en el suelo y por el uso de híbridos de alto potencial

de rendimiento por parte de los agricultores, dado que las condiciones de suelos (degradación y pérdida de la fertilidad) no son las más adecuadas.

La fertilización del maíz con N, P y K ha sido investigada y evaluada durante muchos años por el Instituto Nacional de Investigaciones agrícolas (INIA) (antiguo FONAIAP), en las diferentes regiones productoras de este rubro en el país, en el marco del programa de análisis de suelos, que permitió correlacionar y calibrar los métodos químicos para la extracción de P y K, para la formulación de recomendaciones de dosis de fertilización inorgánica para estos elementos (Beg, 2000). Esta información fue organizada en cuadros de doble entrada para generalizar las recomendaciones.

Con respecto al nitrógeno, los criterios de recomendaciones para el cultivo fueron elaborados con base en las curvas de respuestas obtenidas a través de los experimentos de campo, de carácter puntual, realizados durante la calibración de los métodos químicos, con la limitación de no haber sido concebidos bajo un esquema metodológico que confiriera mayor soporte para extrapolación de los resultados (López *et al.*, 2010).

El esfuerzo del INIA resultó en una importante contribución al diagnóstico de la necesidad de fertilización nitrogenada, fosfatada y potásica, para generar el instructivo usado como método de recomendación de fertilizantes (Casanova, 2000). Sin embargo, estos instructivos han perdido vigencia ya, que fueron elaborados para híbridos que han sido sustituidos por semillas nacionales e internacionales de mayor potencial de rendimiento y exigencias nutricionales más altas (Casanova *et al.*, 1999).

Al respecto, López *et al.* (2010) presentaron un resumen de las investigaciones realizadas por el INIA sobre fertilidad de suelos para incrementar la productividad de los cultivos; en las últimas cinco décadas e informaron sobre los ajustes realizados en la actualidad a las dosis de nutrientes (N, P, K) en el “Manual de recomendaciones de fertilizantes para cultivos prioritarios en Venezuela”. Ejemplo de ello, es el instructivo de fertilización para el maíz, en un suelo Fluventic Haplustolls del estado Aragua, el cual incluye parámetros de suelo, tal como el N disponible, para establecer la dosis de N (INIA, 2005).

4. Propuesta para el manejo de la fertilización nitrogenada en el valle medio del Río Yaracuy, estado Yaracuy.

La sustentabilidad es una obligación en cualquier actividad humana. Una actividad sustentable significa que sea económicamente viable, ambientalmente amigable y socialmente responsable. Dentro de este contexto, la actividad agrícola debe abordar aspectos relacionados con el manejo de la fertilización de los cultivos, los fertilizantes, la eficiencia de la fertilización y el asesoramiento al sector agrícola (Castillo *et al.*, 2011).

Otro aspecto que debe tomarse en cuenta, para el manejo adecuado de la fertilización nitrogenada en el maíz, es el mejoramiento de las limitaciones físicas que presentan los suelos de la zona del valle medio del Río Yaracuy. Entre las alternativas que han sido probadas con buenos resultados están el uso de labranza conservacionista, de residuos orgánicos, barbecho mejorado con leguminosa y adición de residuos orgánicos comerciales (Rivero, 1995; Abreu, 1996; Ohep, 1999; Arrieche, 2008).

Casanova (2000) señaló que en Venezuela se pueden utilizar, en el corto plazo, nuevas tecnologías para mejorar las recomendaciones de fertilización nitrogenada. Algunas de estas alternativas que han generado resultados promisorios, entre otras son: *i*) el uso de índices para el diagnóstico temprano de disponibilidad del N en el suelo, como los contenidos de N mineral medidos al momento de la siembra y en períodos de máximo crecimiento del cultivo y *ii*) el monitoreo del contenido de N con sensores espectrales como el medidor de clorofila.

Los programas computarizados como Sistemas Experto y Modelos de Simulación, como mecanismos integrales e interactivos, permiten evaluar el destino del N en el sistema suelo, cultivo y ambiente, así como el impacto de las prácticas de manejo y del sistema de producción. En este contexto, han sido desarrollados modelos para generar recomendaciones en un entorno social, económico y en condiciones agronómicas específicas (Delgado y Núñez, 2005), así como el Sistema Experto de Manejo de Nutrientes (NuMass, por su siglas en inglés), para diagnosticar deficiencias de N y predecir el requerimiento de nitrógeno como fertilizante para

alcanzar un rendimiento deseado (Osmond *et al.*, 2004).

La panorámica descrita lleva implícita la necesidad actual de realizar esfuerzos conducentes a generar recomendaciones más acordes con las condiciones de clima, suelo y planta, que permitan aumentar la eficiencia de los fertilizantes en la agricultura Venezolana, por lo tanto parece ampliamente justificado realizar investigaciones para evaluar técnicas o métodos eficientes para el diagnóstico del nitrógeno en el suelo con fines de determinar las dosis de nitrógeno más apropiadas para el cultivo de maíz producido en el valle medio del Río Yaracuy del estado Yaracuy.

CAPÍTULO II

CONTENIDO DE NITRÓGENO MINERAL (N-NO₃⁻ Y N-NH₄⁺) EN EL SUELO PARA PREDECIR LA RESPUESTA DEL MAÍZ A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo del maíz (*Zea mays* L.) presenta en la actualidad mayores problemas para alcanzar el rendimiento máximo, atribuibles al cambio climático, principalmente al déficit o exceso de agua, así como a las condiciones edáficas adversas como acidez y baja fertilidad, y al manejo agronómico que se lleve a cabo para las nuevas variedades o híbridos del cultivo. De estos factores, la fertilidad del suelo es un aspecto clave para incrementar la producción y productividad del maíz.

En el valle medio del Río Yaracuy, la producción del maíz se da bajo condiciones de suelos degradados y con bajo contenido de materia orgánica (Ohep, 1999), requiriendo prácticas de manejo que conlleven a minimizar estas condiciones. Los productores de la zona normalmente utilizan dosis constantes de nitrógeno, fósforo y potasio, las cuales, a menudo, están limitadas por el contenido de los fertilizantes de fórmula completa disponibles en el mercado y que en muchos casos no se relacionan con los requerimientos de los nutrientes por cultivo.

Los instructivos de recomendaciones para el cultivo de maíz utilizados actualmente en la localidad de Yaritagua del valle medio, consisten en una dosis predeterminada de nitrógeno para una extensa área de producción y normalmente no se emplean características o índices que reflejen la capacidad de suplencia o disponibilidad del nutriente por el suelo, como el nitrógeno proveniente de la mineralización de la materia orgánica o el inorgánico del suelo en diferentes condiciones de manejo y clima (Delgado, 2002a; INIA, 2005).

Entre las características de suelo utilizadas como indicadores de la disponibilidad de N, las formas minerales N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ y las formas orgánicas,

han sido las más evaluadas (García, 2005). El nitrato (N-NO_3^-) y/o N mineral (N-NO_3^- más N-NH_4^+) en pre-siembra, y N-NO_3^- antes del proceso de reabono, son denominadas pruebas de intensidad e indican la cantidad de N disponible en el suelo (Etchevers, 1999). Estos índices intentan predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada a partir de la disponibilidad de N en el suelo y el requerimiento previsto para un determinado nivel de rendimiento, en función de una mayor precisión de las dosis a recomendar y de un uso sustentable de los recursos (Casanova, 2005).

Contenidos de N mineral del suelo sirvieron de base para delimitar el rendimiento potencial de la cebada, evidenciando el efecto de la baja disponibilidad del elemento sobre la productividad (Santos *et al.*, 2009). Así mismo, proporciones elevadas de N mineral inicial evaluadas hasta los 60 cm y acumuladas (41-60%) en los primeros 20 cm del perfil de los suelos más el fertilizante aplicado, explicaron el comportamiento del cultivo en un suelo proveniente de Maracay, Venezuela (Delgado, 2001a).

El índice de disponibilidad de N, como el contenido de N-NO_3^- en el suelo hasta una profundidad de 30 cm en la fase de desarrollo de cinco a seis hojas totalmente expandidas de maíz, ha generado resultados promisorios. Al respecto, Rambo *et al.* (2007) evaluaron los contenidos de N-NO_3^- en el suelo en diferentes etapas de desarrollo del cultivo y reportaron que la mayor relación de este indicador con el rendimiento del maíz fue para la fase de seis hojas.

A pesar de ser escasos los estudios en Venezuela sobre métodos de diagnóstico de la fertilidad nitrogenada del suelo que permitan elaborar recomendaciones de fertilización con N, en los cuales el N mineral o el contenido de N-NO_3^- hayan sido evaluados como indicadores de la disponibilidad de N en el suelo, se destacan los trabajos en arroz (Pérez y Dorta, 2003) y maíz (Delgado, 2001a) en zonas productoras del estado Cojedes y Aragua, respectivamente.

En función de lo expuesto, se evidencia la necesidad de generar información local, donde la inclusión de índices de suelos permitan mejorar la precisión de los sistemas de recomendación para la fertilización nitrogenada del maíz en la localidad

Yaritagua del valle medio del Río Yaracuy, de manera tal que las dosis de N a aplicar sean apropiados para la condición donde se cultiva.

Objetivo General

Valorar la efectividad del contenido de N mineral (N-NO_3^- y N-NH_4^+) en el suelo previo a la siembra y al momento del estado vegetativo (V5-V6) del maíz, como índice de disponibilidad de N en la predicción de la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada.

Hipótesis

Los contenidos de nitratos y amonio en el suelo, que son las formas principales del elemento utilizadas por el cultivo, de manera indirecta representan una situación de equilibrio entre los principales procesos que afectan la disponibilidad del elemento en el sistema suelo-clima-manejo específico de un área agrícola, entonces los mismos podrían representar un índice de disponibilidad del nitrógeno y afectar la respuesta del cultivo a la aplicación del mismo, para ser utilizado en la determinación de los requerimientos del N por el cultivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. Índices de disponibilidad de N

Los nutrientes disponibles en el suelo limitan la producción del maíz, por lo que es necesario conocer los requerimientos del cultivo y el suministro de éstos por el suelo para determinar las necesidades de fertilización (García, 2005). Para tal fin, se han evaluado índices y métodos de diagnóstico que intentan predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada.

Los índices de disponibilidad de N han sido propuestos para estimar la capacidad del suelo para suplir este elemento. Entre estos índices, el N mineral ha sido utilizado como método de diagnóstico, en el que la principal característica predictiva es el nivel de nitrato del suelo (Bono y Álvarez, 2007). La utilización del nitrato se da en función de que es la especie iónica predominante en muchos suelos, y representa la mayor proporción del N mineral y además se dispone de pruebas rápidas para su determinación. La inclusión del amonio (N-NH_4^+), bajo condiciones de abundantes precipitaciones, es una buena alternativa debido a la menor movilidad de este ion en el perfil del suelo, ya que las arcillas y el componente orgánico contribuyen a su adsorción temporal mientras se nitrifica (Tisdale *et al.*, 1993; Rambo *et al.*, 2007).

Rambo *et al.* (2004) presentaron una discusión del potencial de los métodos que expresan la cantidad de N mineral presente en el suelo como indicador de la disponibilidad de N en el mismo, a los fines de la toma de decisiones sobre el manejo de la fertilización nitrogenada en maíz; estos métodos pueden ser divididos en pruebas de pre-siembra y pre-aplicación del N en la etapa vegetativa del cultivo, conocidos por sus siglas en inglés como PPNT (preplant soil nitrate test) y PSNT (pre-sidedress soil nitrate test), respectivamente.

1.1. N mineral en el suelo en pre-siembra

Los nitratos (N-NO_3^-) son la forma de nitrógeno más fácilmente asimilable por las plantas, su concentración en el suelo informa sobre la cantidad de nitrógeno mineral presente en la solución del suelo, es decir, es una medida directa de la

disponibilidad de N mineral en la zona radicular de la planta, es variable y depende de factores como temperatura, humedad, estado vegetativo del cultivo y manejo del suelo, entre otros (Morón *et al.*, 2002; Bono y Álvarez, 2007).

La evaluación del N-NO₃⁻ en pre-siembra (PS) se basa en la determinación del mismo antes de la siembra del maíz, a 60 cm de profundidad. Este índice ha mostrado potencial para la modificación de las recomendaciones de fertilizantes nitrogenados para suelos del Este de los Estados Unidos cultivados con maíz en rotación con leguminosas (Magdoff *et al.*, 1984).

Además, constituye una herramienta eficaz en el diagnóstico de la fertilización nitrogenada en áreas subhúmedas o semiáridas, pero también ha demostrado su utilidad en zonas húmedas bajo consideraciones especiales de suelo, manejo de cultivo y profundidad de muestreo (García y Deverede, 2006).

La determinación del N mineral disponible en el suelo generalmente se restringe sólo a la determinación de nitrato, debido a la pequeña proporción del amonio en la mayoría de los suelos (Montemurro *et al.*, 2007). Valores críticos de N mineral en suelo, por encima de los cuales la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada es improbable, han servido de base para determinar las posibles pérdidas del rendimiento, cuando hay menor presencia de N disponible para las plantas en los estadios de mayor demanda nutricional (Rambo *et al.*, 2004). Aunque no siempre es un buen predictor del rendimiento (bajas correlaciones) debido a la alta dependencia del N mineral de los factores ambientales (Santos *et al.*, 2009).

Delgado y Cabrera de Bisbal (1998), en un estudio a nivel de invernadero evaluaron la respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de nitrógeno y su relación con diversos índices de suelos en Venezuela, donde los niveles de materia orgánica y el nitrógeno mineral inicial del suelo explicaron en gran parte la variación del N total absorbido por las plantas ($R^2 = 0,87$).

1.2. El N mineral en el suelo en pre-aplicación en la etapa vegetativa del cultivo

El método de determinación del contenido de N mineral en el suelo previo a la aplicación de N o al reabono (PA) en la fase vegetativa de seis hojas totalmente expandidas (V6) del maíz propuesto por Magdoff *et al.* (1984) ha sido uno de los más

estudiados y difundidos en los Estados Unidos. Este método considera la cantidad de N disponible en la etapa de rápido crecimiento del maíz, para asegurar una nutrición adecuada, además el N determinado ha mostrado correlación con el N total del suelo (Salvagiotti *et al.*, 2002b; García, 2005).

Para el cultivo del maíz la escala fenológica más utilizada es la que se basa en los cambios morfológicos de la planta y en los eventos fisiológicos que se suceden en el ciclo de vida de la planta. Los estadios V2 a V14 (Fase vegetativa) están relacionados con la emisión de 2 hasta 14 hojas y la fase reproductiva con el estadio R1 hasta R7, apertura de flores masculinas hasta madurez fisiológica, respectivamente (Fancelli, 1986)

Estudios realizados por Magdoff *et al.* (1984) y Fox *et al.* (1989) mostraron buenas correlaciones entre el rendimiento del maíz y la concentración de nitrato en la capa superficial del suelo (30 cm) cuando las plantas de maíz presentaban una altura de 15 a 30 cm, ello dio base para su uso como prueba de N en suelo, en algunos Estados de Estados Unidos (Binford *et al.*, 1992a).

Salvagiotti *et al.* (2002b) concluyeron que la medición en el suelo de la concentración de $N-NO_3^-$ en la etapa V5-V6, fue un buen indicador de la oferta de N. Los umbrales de respuestas obtenidos fueron diferentes de acuerdo al potencial de producción de cada ambiente, lo que pone de manifiesto la importancia de caracterizar la producción del cada lote.

Por otra parte, Bono y Álvarez (2007) propusieron un modelo de ajuste ($R^2=0,73$) que puede usarse como herramienta para estimar el nivel de nitrato hasta 60 cm de profundidad del perfil, usando como variable predictiva del contenido de nitrato en el estrato 0-20 cm, en la región semiárida y subhúmeda Pampeana de Argentina.

2. Criterio basado en el N disponible para establecer la dosis de nitrógeno

La fertilización nitrogenada puede ser estimada y ajustada con base en el método de balance de N; en el que la dosis se estima de la diferencia entre la demanda del cultivo y la oferta del suelo para cada cultivo. La dinámica del N en el sistema suelo-planta incluye pérdidas de N disponible por lavado, desnitrificación y

volatilización. Este método constituye una aproximación racional a la dosis de fertilizante nitrogenado a aplicar, sin embargo, la falta de información en cuanto a la eficiencia de absorción por el cultivo para diferentes situaciones limita su uso como criterio de diagnóstico (Perdomo y Cardellino, 2007).

El criterio basado en el contenido de nitrógeno disponible (ND) en el suelo, es uno de los más utilizados para determinar las recomendaciones de fertilización nitrogenada (Fontes y Araujo, 2007). El ND para un cultivo, está constituido por el N mineral en el suelo más la dosis de N aplicada como fertilizante. La dosis de N a recomendar sería la diferencia entre la dosis menos el N mineral en el suelo.

Para el cultivo de trigo, el ND en el suelo acumulado hasta 60 cm en pre-siembra, principalmente como nitrato, ha sido utilizado para la recomendación de la fertilización nitrogenada, considerando la dosis como la diferencia entre el ND en el umbral crítico y N del suelo (García y Deverede, 2006),

En este sentido, Delgado (2001) mediante correlación del N mineral inicial (N- NO_3^- y N- NH_4^+), de las profundidades 0-10 y 10-20 cm del suelo más la dosis del N-fertilizante con la producción de materia seca del maíz, obtuvo niveles óptimos de N, los cuales servirían como guía para la estimación del N requerido (N fertilizante + N del suelo) para cubrir las exigencias del cultivo, aunque señala que los mismos están sujetos a variaciones de las condiciones del cultivo, clima y manejo del sistema agrícola.

En las evaluaciones del nitrógeno en suelo en pre-siembra y previo aplicación en la etapa vegetativa del maíz, el N- NO_3^- es la especie predominante en los suelos y la que ha sido más estudiada. Sin embargo, la evaluación del nitrato en conjunto con el amonio (N mineral) podría ser efectiva como criterio de manejo de la fertilización nitrogenada en el maíz. Estas determinaciones ayudarían a mejorar la eficiencia de uso del N aplicado porque permiten sincronizar la época de aplicación del N con las etapas de mayor requerimiento de N por la planta, la cual ocurre durante el periodo vegetativo del maíz. Además, estas determinaciones pueden ser incluidas en los análisis de rutina de suelo e incorporadas en las estimaciones de la dosis de N a recomendar.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Ubicación geográfica del área experimental

El estudio se realizó durante el período lluvioso (mayo-octubre) del 2009 y 2010, en el campo experimental de la Estación Yaritagua del INIA, ubicado en la localidad de Yaritagua del municipio Peña, estado Yaracuy, en las siguientes coordenadas geográficas: latitud ($10^{\circ} 05' 37''$) norte y longitud ($69^{\circ} 07' 19''$) oeste, a una altitud de 307 m.s.n.m.



Figura 1. Vista aérea de la Estación Yaritagua INIA Yaracuy y área del ensayo. Fuente: Programa Google Earth, 2009.

2. Características generales de la zona de estudio

El clima de la zona se corresponde con un bosque seco tropical, caracterizado por un período de sequía de 4 a 6 meses. La precipitación anual es de 1038,3 mm, distribuida entre mayo y agosto. La temperatura promedio anual es 26,8 °C. La información sobre condiciones climáticas durante el estudio se tomó de los registros

meteorológicos de la estación Climatológica ubicada en la Estación Yaritagua, cercana al sitio de ensayo. Los resultados de la precipitación, evaporación diaria y mensual durante los meses de desarrollo del cultivo, durante el año 2010 se presentan en el Apéndice II-1 y II-2, respectivamente.

La precipitación acumulada por semana registrada en el año 2010 desde la siembra hasta cosecha fue 525,0 mm (Figura 2). De la cual 370,9 mm (70%) ocurrió en la etapa vegetativa hasta el inicio de floración (60 días después de la siembra). La menor cantidad de lluvia caída 44,1 mm, coincidió con la etapa de floración del cultivo y se prolongó hasta el comienzo del llenado de grano con un total de 154,1 mm, lo cual pudo haber ocasionado déficit hídrico durante estas etapas, condición que reduce el potencial productivo del cultivo.

La temperatura máxima y mínima del aire fue incrementando a partir de 21 y 30 días después de la siembra (dds) correspondiente al mes de julio, con temperaturas máximas superiores a los 30°C a partir del mes de septiembre (76 dds) (Figura 2). Las temperaturas medias más bajas se presentaron en la etapa de emergencia de las plántulas, temperaturas que no afectaron el crecimiento del cultivo.

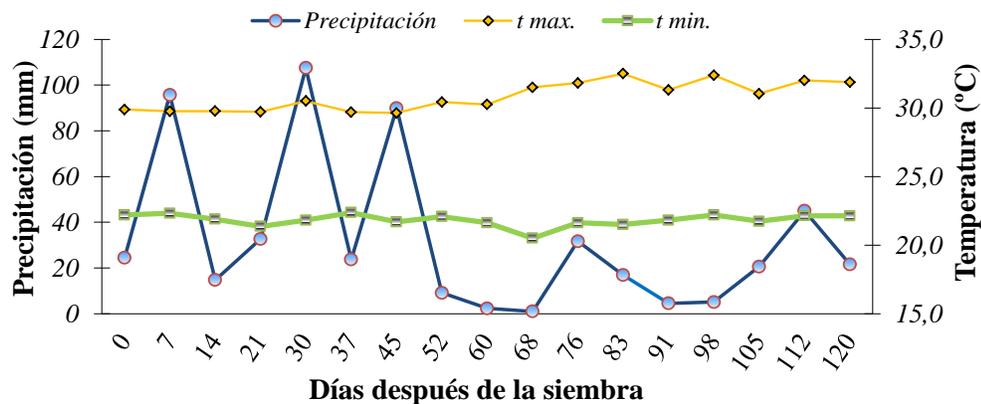


Figura 2. Precipitación y temperaturas mensuales durante el ciclo del cultivo. A partir de la fecha de siembra: 15 de julio del 2010.

El suelo del área experimental pertenece al orden Alfisol y fue clasificado taxonómicamente según Comerma y Ovalles (1984), como Oxic Haplustalfs, franco

fino, caolinítico, no ácido, isohipertérmico, perteneciente a la Serie Uribeque, el cual en superficie presenta textura franco arenosa y franco arcillo arenosa, en su parte inferior es arcilloso a franco arcilloso y franco arenoso a franco; con estructura blocosa subangular, de moderado desarrollo, permeabilidad moderada, con pendiente del terreno entre 3 y 4%, y ligeras limitaciones por topografía (Mendoza *et al.*, 1983).

Evaluaciones de las condiciones físicas del suelo llevadas a cabo en otra investigación en el mismo sitio experimental (Ohep, 2001), indicaron una alta degradación, producto del cultivo de maíz como monocultivo con labranza secundaria, principalmente arado, lo que ha causado deterioro de la estructura por degradación superficial, erosión y compactación subsuperficial, aproximadamente a los 20 cm de profundidad. En general, el suelo de la parcela experimental se caracteriza por presentar un horizonte argílico y alta erosión hídrica (Ohep, 2001).

3. Evaluación del impacto de los contenidos de N inorgánico del suelo en la nutrición del cultivo y determinación de dosis de N

Para evaluar el impacto del contenido de N inorgánico (N-NO_3^- y N-NH_4^+) y mineral ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4$), al momento de la siembra y en la etapa de cinco (V5) y seis (V6) hojas totalmente expandidas, en la nutrición del cultivo y en la determinación de dosis apropiadas de fertilización nitrogenada, se evaluó la respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N en condiciones variables de N en el suelo (Segundo año), producto de la creación de un gradiente de nitrógeno en el primer año del estudio como lo indicaron Bundy y Malone (1988).

3.1. Creación del gradiente de nitrógeno en el suelo

La creación del gradiente se logró en el primer año de estudio (2009) mediante la aplicación de cantidades elevadas y crecientes de N (0, 150, 300 y 450 kg ha⁻¹), en forma de Urea, aplicada diez días antes de la siembra e incorporada con un pase de rastra. Previo al establecimiento del gradiente, el terreno fue preparado con un pase de big-rome y dos pases de rastra.

Se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones cuya unidad experimental o parcela grande consistió de 14 hileras de cultivo distanciadas a 0,85 m

y de 29 m de largo, para un área total de 345,1 m². Cada bloque tuvo una dimensión de 47,6 m de ancho por 29 m de largo, con una separación entre bloques de 1 m, para un área total del ensayo de 4284 m² (Figura 3).

Se sembró el híbrido de maíz HR101 el 25 de junio del 2009, con una densidad de planta de 60.000 plantas ha⁻¹, con el fin de garantizar la incidencia de factores bióticos que afectan la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. El cultivo se cosechó cuando alcanzó la madurez fisiológica (14 de octubre del 2009).

Se estimó producción de materia seca a partir de diez plantas seleccionadas al azar por unidad experimental, al final del ciclo del cultivo. Las plantas fueron cortadas desde el cuello y se determinó en estufa a 65°C, a peso constante.

3.2. Evaluación de la respuesta del maíz a la aplicación de dosis de N y su relación con los índices de planta y del suelo.

Para evaluar el impacto de los contenidos de N mineral del suelo en la nutrición del maíz en cada unidad experimental donde se creó el gradiente de N mineral, para el segundo del estudio, se evaluó la respuesta del maíz a la aplicación de 0, 40, 95, 120, 160 y 240 kg ha⁻¹ de N.

Las dosis de N evaluadas fueron determinadas de acuerdo a los siguientes criterios: 120 kg ha⁻¹ según el instructivo de recomendación para maíz de la Estación Experimental de Yaritagua (INIA, 2005); 160 kg ha⁻¹ correspondió a la cantidad de N recomendada para el cultivo y para los productores de la localidad, por el ente financiador FONDAS (Fondo para el Desarrollo Agrario Socialista); 95 kg ha⁻¹ predicha por el NuMaSS con los datos de suelo y del cultivo preliminares obtenidos de las parcelas principales con el tratamiento de 150 kg N ha⁻¹ del gradiente de N; dos dosis una por abajo (0 y 40 kg ha⁻¹) y otra arriba (240 kg N ha⁻¹) de las establecidas.

Los tratamientos de dosis de N fueron arreglados en parcelas divididas con tres repeticiones, en bloques al azar, donde las dosis de N establecidas en el primer año del estudio (0 a 450 kg ha⁻¹), correspondieron a las parcelas principales, las cuales no se consideran para la evaluación de la respuesta del cultivo para el 2^{do} año y las dosis de N (0 a 240 kg ha⁻¹) para el segundo año a las subparcelas.

La subparcela consistió de 6 hileras de cultivo separadas a 0,83 m entre sí y de 10 m de largo (44,82 m²). Se consideró como bordura, una hilera a ambos lados de cada subparcela y 0,5 m en los bordes de las hileras. Los cuatro hilos centrales, de cada subparcela, conformaron la unidad experimental efectiva (29,88 m²) y los dos hilos centrales se destinaron para la evaluación del rendimiento del cultivo en una efectiva de 14,49 m². Cada tratamiento estuvo separado por dos hileras de cultivos (Figura 3).

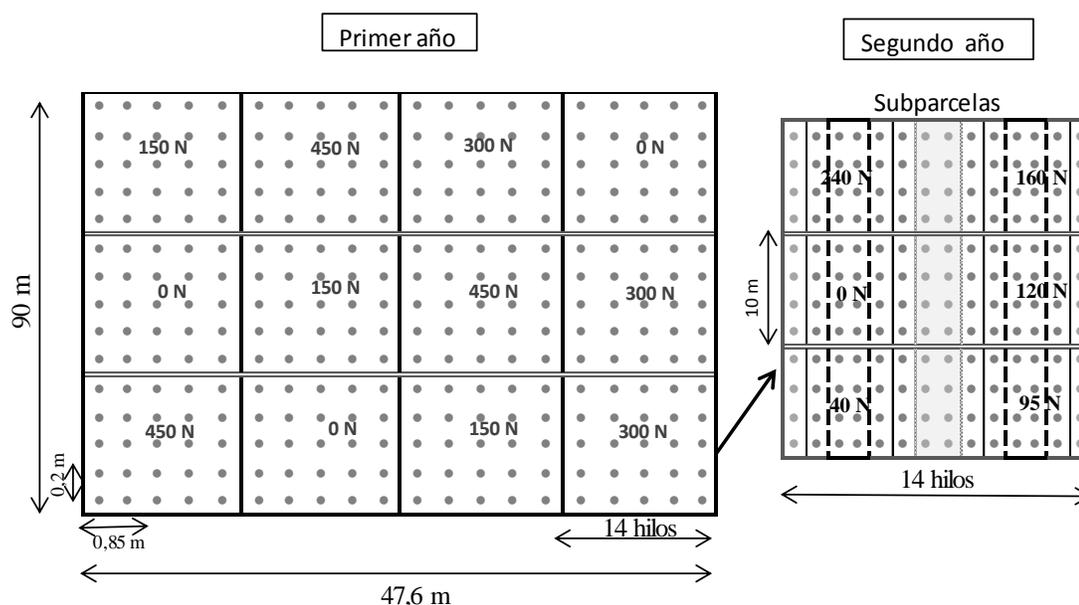


Figura 3. Esquema representativo del diseño de experimento, se ilustran las parcelas principales (Primer año) y las subparcelas (Segundo año).

El suelo se preparó antes de la siembra del maíz con un pase de big-rome y dos pases de rastra y se sembró con sembradora abonadora de dos tolvas, calibrada para una población de 60 mil plantas por hectárea.

La fecha de siembra correspondió al 15 de junio del 2010 y se cultivó el híbrido de maíz DK 357. Al momento de la siembra se aplicó la fertilización básica con 50 kg ha⁻¹ P₂O₅ como fosfato monoamónico (11% N y 52% de P₂O₅) y 60 kg ha⁻¹ de K₂O como cloruro de potasio (60% K₂O), en banda incorporada a 5 cm del hilo de siembra, en todos los tratamientos. Luego de la siembra y hasta dos días después de la misma,

se aplicó, en forma manual y con Urea, 1/3 de la dosis de cada uno de los tratamientos, en banda enterrado a 15 cm del hilo de siembra y a cinco cm de profundidad. Para el tratamiento 0 kg ha⁻¹, no se pudo utilizar como testigo absoluto debido a que no se encontró en el mercado regional una fuente de fósforo libre de N, por lo que el testigo recibió 5,5 kg N ha⁻¹, el cual es una cantidad baja en relación al resto de los tratamientos nitrogenados. La cantidad restante para completar la dosis por tratamiento fue aplicada a los 28-30 después de la siembra (dds).

El control de malezas fue realizado cuando el cultivo estaba en la etapa V2, utilizando herbicidas post-emergentes a base de Atrazina y Nicosulfurón en dosis de 2 L ha⁻¹ del producto comercial.

3.2.1. Determinación de las características físicas y química del suelo.

Para las evaluaciones de las características físicas del suelo, se tomaron muestras no alteradas para el 2^{do} año del estudio, por bloque y antes de la preparación del terreno. Las muestras de suelos fueron tomadas con cilindros (mediante el barreno tipo Uhland), cubiertas en la parte inferior del cilindro con malla de liencillo y enviadas, para su posterior análisis en el Laboratorio de Física de Suelos de la Unidad de Investigación de Suelos y Nutrición de Planta. La densidad aparente (Da), macro (Mp) y microporosidad (Rh) y conductividad hidráulica saturada (Ks), fueron determinadas siguiendo las metodologías indicadas por Pla (1983).

Para la evaluación de la fertilidad del suelo, se tomaron muestras disturbadas previo a la siembra, cinco submuestras por bloque para conformar una muestra compuestas, a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-40 cm). Las mismas fueron secadas, tamizadas (tamiz de 2 mm de diámetro) y almacenadas en recipientes plásticos para su posterior análisis en el Laboratorio de Suelos de la Unidad de Investigación de Suelos y Nutrición Mineral de Planta, Decanato de Agronomía, UCLA.

A las muestras de suelo seca al aire se les realizaron las determinaciones analíticas de: pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), P, K, Ca, Mg y textura, siguiendo los procedimientos descritos en el Manual de métodos y procedimientos de referencia con fines de fertilidad (Brito, *et al.*, 1990). El pH y CE,

se midieron en relación suelo:agua (1:2,5), por el método potenciométrico y conductimétrico, respectivamente. El porcentaje de MO, cuantificado por medio de la oxidación del carbono orgánico, por el método de combustión húmeda con dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado, con determinación del carbono orgánico por colorimetría, según el método Walkey y Black (Allison, 1975). Los contenidos de nutrientes disponibles fueron extraídos de la siguiente manera: fósforo (P), con solución de bicarbonato de sodio 0,5M a pH 8,5, en relación 1:20 (solución:extracto) y su determinación colorimetría, según el Método de Olsen (Olsen y Dean, 1965); potasio (K), calcio (Ca) y magnesio intercambiable (Mg), con solución de acetato de amonio 1M a pH 7,0. La determinación del K por fotometría de llama (Pratt, 1965) y la del Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica (Hesse, 1971). La capacidad de intercambio catiónico (CIC), se determinó por suma de bases, utilizando una solución de acetato de amonio a pH 7,0. La clase textural se determinó por análisis granulométrico por densimetría con hidrómetro, en solución con polifosfatocarbonato de sodio a pH 8,5 por el método de Bouyoucos (Black, 1975). Todos los elementos fueron expresados en mg kg^{-1} (Cuadro 1).

Al momento de la siembra se determinó el porcentaje de humedad (%H) del suelo a tres profundidades. Las muestras de suelos fueron tomadas con cilindros (mediante el barreno tipo Uhland), a tres profundidades. Las cuales fueron pesadas (peso húmedo) y colocadas en estufa a 105 °C durante 24 horas, al cabo del cual se tomó el peso seco, determinado de acuerdo a la fórmula:

$$\% \text{Humedad} = [(\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}) / \text{Peso seco}] * 100.$$

3.2.2. Evaluación del rendimiento del maíz

La cosecha fue realizada cuando los granos alcanzaron 20% humedad. El rendimiento en grano (Rend.) y la producción de materia seca, fue evaluado a partir de la cosecha de un área útil de 14,49 m^2 (dos hilos centrales) de cada subparcela. El Rend. fue corregido al 12% y expresado en Mg ha^{-1} . Para la cuantificación de la materia seca, se tomaron diez plantas por tratamiento, cortada desde el cuello y secada a 70 °C por 48 horas. Las plantas seleccionadas fueron divididas en hojas, hojas de

mazorcas o brácteas, tallo, tusa y grano, para su análisis posterior del contenido de N total.

$$\text{Rend.}(12\%) = \text{Peso del grano} \times (100 - \% \text{ humedad del grano}) / (100-12)$$

Cuadro 1. Características físico-químicas del suelo donde se realizó el estudio.

Prof.	Da	Mp	Rh	Ks	a	L	A	Textura
cm	Mg m⁻³		%	cm h⁻¹		%		
0-10	1,57	41	25	0,18	54,3	23,8	21,8	FAa
10-20	1,73	38	23	0,26	52,6	22,7	34,7	FAa
20-30	1,56	41	25	0,13	49,3	21,8	28,8	FA

	pH	CE	MO	P	K	Ca	Mg	CIC
cm	1:2,5	dS m⁻¹	g kg⁻¹			mg kg⁻¹		cmol kg⁻¹
0-10	6,2 La	0,22 B	17,0 B	21 A	182 A	600 M	78 B	4,20
10-20	6,4 La	0,12 B	13,3 B	17 M	124 M	847 M	75 B	4,26
20-40	7,1 N	0,10 B	10,0 B	14 M	74 B	1577 A	58	

Da (Densidad aparente), Mp (macroporosidad); Rh (microporos), Ks (conductividad hidráulica), arena (a), limo (L) y arcilla (A); La (Ligeramente ácido), N (Neutro); A (Alto), M (Medio), B(Bajo).

3.2.3. Determinación del nitrógeno inorgánico en suelo

En cada una de las parcelas principales, y previo a la implementación del estudio de respuesta del cultivo a la aplicación de dosis crecientes de N, se tomó una muestra compuesta por cada unidad experimental, mediante la recolección de cinco submuestras de suelos en las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-40 cm.

En la fase de cinco y seis hojas totalmente expandidas (V5-V6) del cultivo, previo a la segunda aplicación del fertilizante (reabono), en cada una de las subparcelas, se tomaron muestras compuestas de suelo formadas por tres submuestras. Cada submuestra estuvo conformada por cuatro muestras tomadas en las entrelíneas del maíz, a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-40 cm), de acuerdo con la metodología utilizada por Rambo *et al.* (2007). Las muestras fueron colocadas en

bolsas plástica, refrigeradas y enviadas al Laboratorio de Suelos donde fueron almacenadas a 10°C para su posterior análisis.

Todos las muestras de suelos fueron secadas a estufa a 35 °C, homogenizadas, tamizadas con tamiz de 2 mm de diámetro y almacenadas en bolsas plásticas con cierre hermético, para el análisis y determinación de la concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) y nítrico (N-NO₃⁻), en el Laboratorio de Suelo-Agua-Planta del Centro Nacional de Investigaciones agropecuarias, INIA-CENIAP, Maracay. La extracción de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ se realizó con una solución KCl (2M) como lo indica Faust (1987): Se pesaron 5 g de suelo y se adicionaron 50 ml de la solución extractante de KCl 2M (10 ml g de suelo⁻¹), se agitó durante una hora y se filtró el sobrenadante con papel filtro whatman N° 42.

Para la destilación del N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ se tomó una alícuota (20 – 25 ml) para proceder a la destilación por arrastre de vapor por Micro Kjeldahl, en presencia de 200 mg MgO (seco previamente en mufla a 300 °C, por una hora), el destilado (100 ml) fue recibido en una alícuota de 10 ml de HCl (p.a) 0,005 M para la determinación de amonio. En el mismo extracto con MgO se agregó 200 mg aleación de Devarda (tamaño de grano: 0,05 a 0,2 mm) para la determinación de nitratos, los cuales fueron recibidos en 10 ml de HCl 0,005M. La valoración del N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ se realizó con una solución estándar de NaOH 0,005M en presencia de un indicador mixto (rojo de metilo y azul de metilo) en los 100 ml de solución destilada, la cual adquiere un color morado. Luego se titula con el hidróxido de sodio hasta el viraje de la solución a color añil verdoso.

Las concentraciones del N inorgánico para la profundidad de 0-20 y 0-40 cm se promediaron en forma ponderada, calculadas a partir de las concentraciones medidas en cada intervalo de profundidad de muestreo (0-10, 10-20 y 20-40 cm) de la siguiente manera:

$$\text{N inorgánico, mg kg}^{-1} \text{ (0-40cm)} = [(\text{Concentración N} \cdot 10\text{cm} + \text{concentración N} \cdot 10 + \text{concentración N} \cdot 20\text{cm}) / 40 \text{ cm}]$$

Para estimar la cantidad de N mineral en cada una de sus formas (N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻) se consideró la densidad aparente del suelo para cada profundidad del muestreo

(0-10, 10-20 y 20-40 cm) y cada aumento de la profundidad del suelo (0-20 y 0-40 cm) correspondió a la suma aritmética de las cantidades de cada forma del N.

3.3. Determinación del nivel crítico de N mineral para la predicción de la respuesta del maíz a la aplicación de fertilizante nitrogenado

La determinación del nivel crítico de concentración de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y N mineral ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) en suelo, por encima del cual no ocurriría respuesta del cultivo a la aplicación del elemento (Malavolta, 2006), se estimó mediante ajuste de modelos lineal-meseta o cuadráticos para representar la relación entre la concentración del N en el suelo en una capa de suelo determinada (0-10, 0-20, 0-40 cm) de los tratamientos con 0, 150, 300 y 450 kg ha⁻¹ aplicados en el gradiente (Parcelas principales) y el rendimiento relativo (RR). Este último, se calculó dividiendo el rendimiento del tratamiento con 0 kg ha⁻¹ entre el rendimiento máximo obtenido del estudio de respuesta a la aplicación de 0, 40, 95, 120, 160 y 240 kg N ha⁻¹ en cada una de las parcelas principales.

El modelo lineal-meseta es una función continua con un punto de quiebre, que relaciona la concentración del N_{min} en el suelo con el RR, el cual representa la concentración crítica del elemento. Por debajo de este punto, la respuesta disminuye en forma más o menos lineal y por encima se mantiene constante (meseta), a un nivel de respuesta bajo (Gutiérrez *et al.*, 2012).

4. Análisis Estadístico

Los datos de rendimiento, concentración y cantidad de nitrógeno en el suelo (N-NO_3^- , N-NH_4^+ y N mineral) fueron sometidos a análisis de varianza de acuerdo a un arreglo de tratamiento en parcelas dividida, según el modelo indicado:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \rho_k + \delta_{ik} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

donde: Y_{ijk} es el contenido de N en el suelo y rendimiento de granos; μ es la media de las observaciones; α_i , el efecto debido al i-ésimo nivel de N aplicado en el gradiente (1^{er} año), (factor A); ρ_k el efecto de la k-ésima repetición; δ_{ik} el componente aleatorio del error asociado al i-ésimo nivel del factor A y la k-ésima repetición; β_j es el efecto del j-ésimo nivel de N aplicado en dosis (2^{do} año), (factor B); $(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto de la

interacción de primer orden del i-ésimo nivel de N aplicado en el gradiente y el j-ésimo nivel de N aplicado en dosis; ε_{ijk} el error experimental de i-ésimo nivel del factor A, el j-ésimo nivel del factor B y k-ésima repetición.

Los contenidos de nitrógeno en suelo obtenidos se relacionaron con el rendimiento de grano mediante análisis de correlación y regresión simple y cuadrática, utilizando el Programa SAS (SAS Institute, 1999).

Los modelos lineales, cuadráticos, lineal-meseta y cuadrático-meseta fueron usados para determinar la concentración crítica y respuesta máxima a la fertilización nitrogenada. Estos modelos responden a la ley de rendimientos no proporcionales y presentan un óptimo de concentración de N en el suelo alrededor del máximo rendimiento, después del cual declina más allá del nivel del nutriente donde se alcanza el máximo rendimiento (Barbieri *et al.*, 2009).

Estos modelos fueron ajustados usando el procedimiento lineal (PROC REG) y no lineal (PROC NLIN) del paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1999). Los modelos lineal-meseta y cuadrático-meseta fueron sometidos a la metodología de Gaus-Newton para estimar los parámetros:

- i.** Modelo lineal, definido por la siguiente ecuación:

$$Y = a + bx \quad (1)$$

- ii.** Modelo cuadrático, definido por la ecuación:

$$Y = a + bx + cx^2 \quad (2)$$

- iii.** Modelo lineal meseta, definido por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} Y &= a + bx & \text{si } x < x_0 \\ Y &= P & \text{si } x \geq x_0 \end{aligned} \quad (3)$$

- iv.** Modelo Cuadrático con respuesta en meseta

$$\begin{aligned} Y &= a + bx + c^2 & \text{si } x < x_0 \\ Y &= P & \text{si } x \geq x_0 \end{aligned} \quad (4)$$

donde Y es el rendimiento en grano de maíz (kg ha^{-1}); a, b y c son el intercepto, coeficiente lineal y coeficiente cuadrático, respectivamente y x es la dosis de N, contenido de N (kg ha^{-1}) en el suelo o la suma de ambos. x_0 es la concentración de N en el suelo o dosis de N en el punto de intersección del modelo lineal con el de meseta

(*P*). De esta forma, para valores de x menores de x_0 el modelo describe la respuesta como una función lineal y para valores de x mayores o iguales a x_0 la ecuación es una constante o meseta.

Estos modelos fueron evaluados con base en criterio lógica biológica, cuando se verifica que después de una cierta dosis de fertilización o contenido de N en el suelo no ocurre un aumento significativo en el rendimiento del cultivo. Se consideraron valores significativos de coeficiente de determinación (R^2) y de los parámetros de la regresión, a una significancia al 5 %.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Evaluación de los contenidos de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y N mineral inicial en el suelo previo a la siembra del maíz.

Los contenidos iniciales de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y N mineral (la suma de ambos) previo a la siembra del maíz para el segundo año del estudio, producto del gradiente establecido y sus promedios ponderados, para las profundidades 0-10, 0-20 y 0-40 cm, fueron sensibles a la variabilidad creada por las cantidades de N aplicadas en el primer año del estudio. Las mayores concentraciones de nitrato y amonio se encontraron a los 15 cm de profundidad en los tratamientos 450 y 300 kg N ha^{-1} con 23,94 y 19,85 mg kg^{-1} , respectivamente (Figura 4). Sin embargo, a mayor profundidad se evidenció una tendencia a disminuir hasta concentraciones de 14,12 y 14,77 mg kg^{-1} en promedio para 300 y 450 kg N ha^{-1} , respectivamente. Para el tratamiento 0 kg N ha^{-1} la máxima concentración de N-NO_3^- fue 11 mg kg^{-1} a los 15 cm de profundidad. Tendencia y concentraciones de N-NO_3^- semejantes con valores de 32,11 mg kg^{-1} en el espesor superficial (0-10 cm) y superiores a las obtenidas en las capas adyacentes (desde 17,04 hasta 14,65 mg kg^{-1}) en sistemas de siembra directa, fueron encontradas por D'Andréa *et al.* (2004).

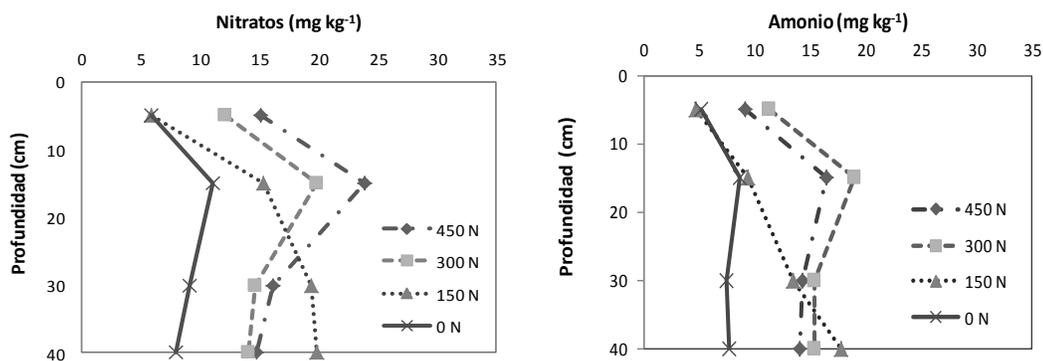


Figura 4. Contenido de nitratos y amonio inicial en el perfil del suelo, asociado a contenido variable de N.

Las concentraciones promedio de nitrato y amonio mostraron una disminución desde las profundidades superficiales hacia las más profundas. Sin embargo, la menor concentración de N-NH_4^+ en suelos arables como consecuencia de la alta tasa de nitrificación (Bregliani *et al.*, 2006). Se estima que gran parte del nitrato en las capas superficiales fue derivado de la mineralización de la materia orgánica inducida por la labranza previa a la siembra del cultivo, explicación señalada por Spargo *et al.* (2009).

Así mismo, se observa que la proporción de N-NH_4^+ es similar a la de N-NO_3^- en las capas superficiales. Estudios en suelos de la misma zona, mostraron que la concentración inicial de amonio fue superior a la de nitratos hasta la segunda semana de incubación y fue superior en el suelo con pH alcalino con respecto al suelo con pH ácido (Arrieche, 2008). Rivero *et al.* (2004) señalaron que la producción de N-NH_4^+ duplicó la de N-NO_3^- , tendencia que pudo estar vinculada a las características del suelo, proveniente de las Sabanas del estado Guárico, Venezuela; los autores destacaron que el pH del suelo 3,94 podría ser el factor más importante. Estos estudios muestran el efecto que tiene el pH del suelo en los procesos de mineralización y nitrificación del N del suelo. En la mayoría de los suelos cultivados, en particular en la zona tropical, el nitrato es la principal forma de absorción del N por las plantas, sin embargo, en condiciones donde hay inhibición de la nitrificación, es posible constatar ambas formas de N en el suelo (Cruz *et al.*, 2006).

En general, las concentraciones promedio de N mineral (Nmin) más elevadas se encontraron en las parcelas proveniente de la fertilización con dosis de 300 y 450 kg N ha⁻¹ y mostraron mayor N residual de las dosis aplicadas en el 1^{er} año para las profundidades 0-10 y 0-20 cm (Figura 5). Esta tendencia concuerda con lo mostrado por Scian *et al.* (2008), quienes encontraron que los contenidos de nitrógeno extraídos del suelo fueron mayores en la profundidad más superficial (20 cm) y sugieren que esto estaría relacionado con las aplicaciones del fertilizante en forma de Urea, utilizadas en el ciclo anterior y que en los estratos menos profundos se encuentra un mayor número de microorganismos y concentración de urea, lo cual generaría incrementos en la concentración del N-NO_3^- .

Con respecto al tratamiento 150 kg ha^{-1} de N, se observó una tendencia diferente manifestada como un incremento en la concentración de nitrato, amonio y Nmin a los 30 y 40 cm de profundidad, debido posiblemente a una mayor lixiviación, que pudo estar relacionada con un aumento de la humedad en las profundidades muestreadas, producto de la cercanía de un afluyente correspondiente a un curso de agua o de la variabilidad en las características físicas del suelo. Tendencias parecidas fueron reportadas por Salazar-Sosa *et al.* (2009), para profundidades mayores a las de este estudio, que los autores atribuyeron a la heterogeneidad de los perfiles de suelo.

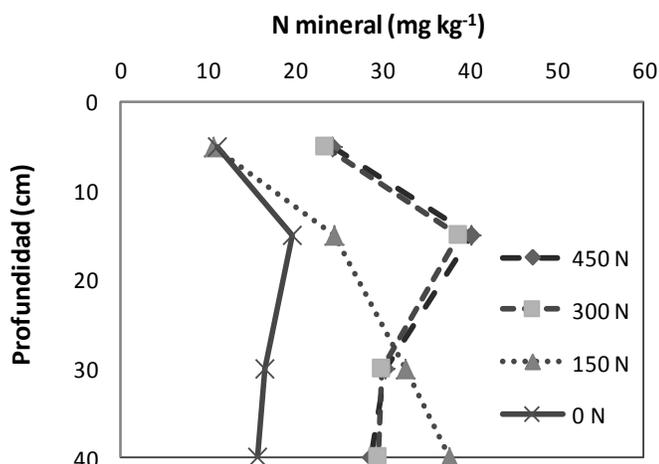


Figura 5. N mineral inicial en el perfil del suelo, asociado a contenidos variables de N.

La medición del N inorgánico en el suelo, previo a la siembra del maíz (2^{do} año), mostró una cantidad de N residual retenido en el perfil después del ciclo del cultivo y los factores y procesos que afectaron la disponibilidad del N (1^{er} año), que guarda relación con las dosis crecientes del nitrógeno aplicado para el primer año del estudio. Bundy y Malone (1988) consiguieron cantidades importantes de nitratos retenidos en el perfil del suelo luego de aplicaciones de N en el ciclo anterior del maíz, las cuales excedieron los requerimientos de N del cultivo.

Las concentraciones de nitrato y amonio encontradas en todo el perfil de suelo fueron similares, además una especie no predominó sobre la otra y por el hecho que

ambas son utilizadas por el cultivo, la suma de ambas conforman el N evaluado como el N mineral (N_{min}) en el suelo.

En general, los contenidos de N mineral residual en el suelo reflejaron la variabilidad creada, producto de la aplicación de las cantidades de N previamente, condición que permitió evaluar el impacto de estos contenidos como iniciales en el suelo en la evaluación de la respuesta del cultivo a la aplicación de dosis de N (0, 45, 95, 120, 160 y 240 kg ha⁻¹).

1.1 Relación entre el rendimiento de maíz y la concentración de nitrógeno inorgánico en el suelo.

Con el fin de verificar la relación entre las concentraciones ponderadas de nitrato, amonio y N mineral inicial en el perfil del suelo en las 12 parcelas principales, con el rendimiento del maíz obtenido con la dosis de 0 kg N ha⁻¹, se realizaron análisis de regresión cuadrática y lineal simple (Figuras 6 y 7). Las concentraciones de N-NO₃⁻ para las profundidades 0-20 y 0-40 cm, mostraron relación significativa (P<0,05) con el rendimiento, ajustada a regresión cuadrática. Posiblemente al aumento de la profundidad del suelo, relacionado con un mayor volumen de exploración y absorción de nutrientes por las raíces del cultivo. Mientras que las concentraciones de N-NO₃⁻ a 0-10 cm y del N-NH₄⁺ a 0-10 y 0-20 cm no presentaron (P>0,05) relación. Posiblemente el estrecho rango de variación en la concentración del amonio no permitió mostrar una relación con el rendimiento del cultivo.

La concentración de N-NO₃⁻ explicó mejor el rendimiento del maíz, resultado que coincide con las observaciones realizadas en otros estudios, que sugieren que esta forma del N constituye un mejor índice de disponibilidad de N que el amonio (Holford y Doyle, 1992).

La segunda derivada de las ecuaciones cuadráticas (Figura 6), permitió obtener la máxima concentración de N-NO₃⁻, por encima de la cual no se incrementó la producción de grano y generó valores críticos de 23,03 y 23,13 mg kg⁻¹ para las profundidades 0-20 y 0-40 cm, respectivamente. Estos valores están en el mismo orden de magnitud que los señalados para N-NO₃⁻ (24 y 20 mg kg⁻¹, para 0-15 y 0-30 cm, respectivamente) por Holford y Doyle (1992).

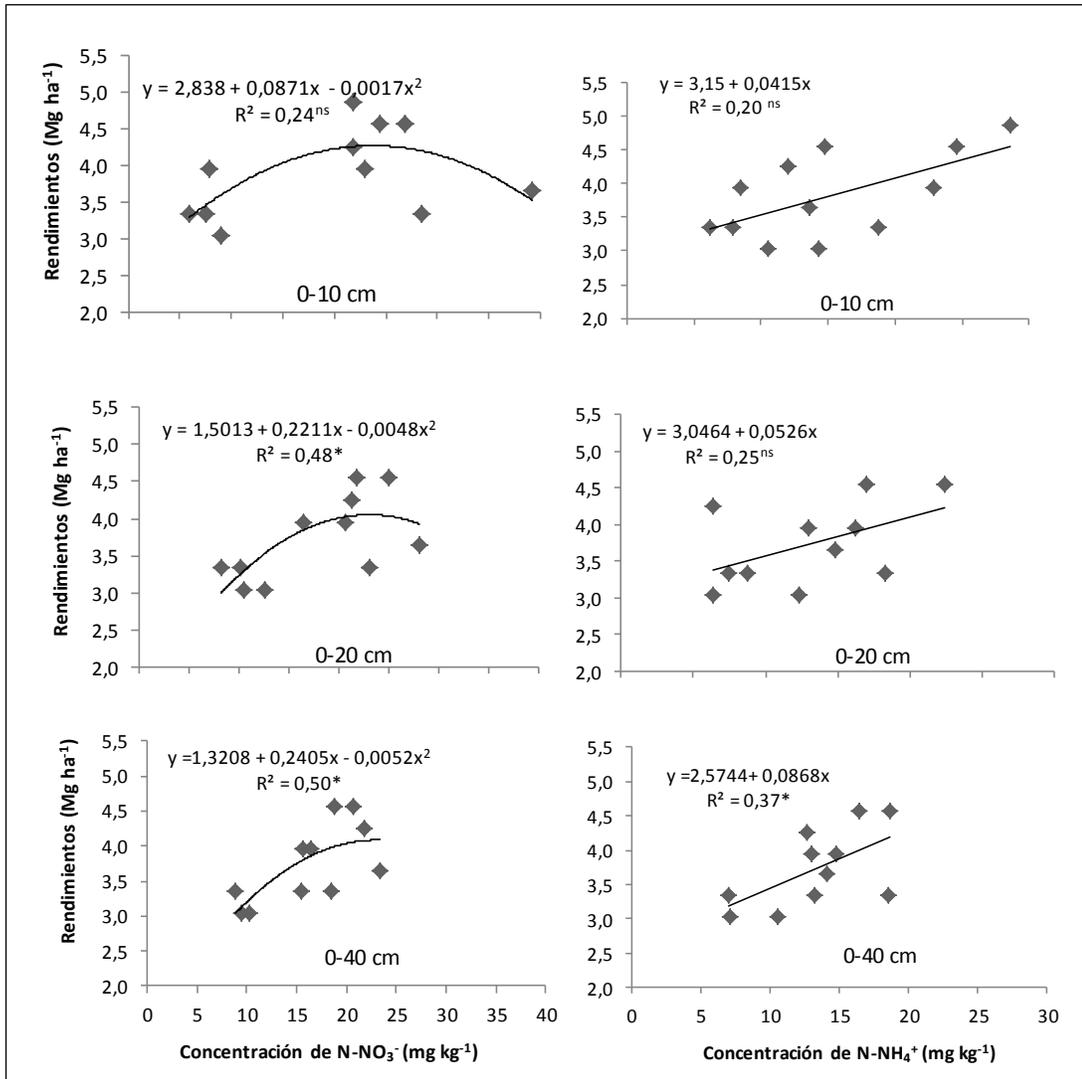


Figura 6. Relación entre rendimiento de maíz en los tratamientos con 0 kg N ha⁻¹ y contenidos de N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ a diferentes profundidades de muestreo.

El N mineral del suelo presentó ajuste lineal significativo ($P < 0,05$) aunque con R^2 bajos de 0,38 y 0,48 a 0-20 y 0-40 cm, respectivamente (Figura 7). Aunque el aporte de las cantidades de amonio, en el N mineral, no mejoraron las relaciones entre Nmin y el rendimiento, su cuantificación no debe ser descartada, por las cantidades registradas en estos suelos. En condiciones de suelos que recibieron fuentes de

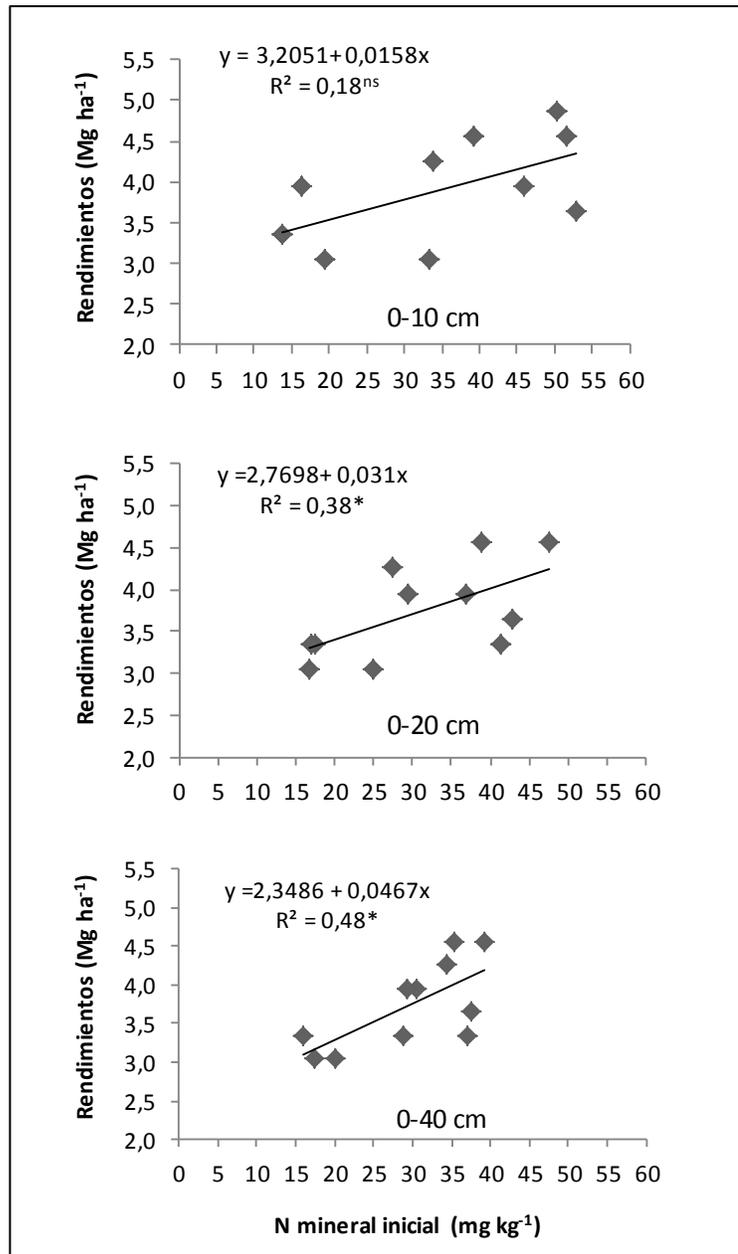


Figura 7. Relación entre el rendimiento de maíz en los tratamientos con 0 kg N ha⁻¹ y la concentración de N mineral inicial a diferentes profundidades de muestreo.

nitrógeno amoniacal, la concentración de N-NH_4^+ puede ser importante (Binford *et al.*, 1992a).

Los bajos coeficientes de determinación de la regresión entre la concentración de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y Nmin en la capa 0-10 cm con el rendimiento del cultivo, posiblemente esté relacionado con la mayor variación en sus contenidos en la profundidad superficial, asociado a las condiciones climáticas y manejo del suelo. Al respecto, Holford y Doyle (1992) observaron un aumento en las correlaciones entre Nmin y producción de grano, producto del incremento de la profundidad de muestreo hasta los 30 cm.

Maroko *et al.* (1998), señalaron que el rendimiento del maíz se incrementó linealmente con la concentración de nitrato residual en el suelo a 0-15 cm, en un Alfisol, antes de la siembra ($R^2=0,78$), producto de los procesos de pérdida y ganancia del N en el subsuelo bajo vegetación de barbecho y sin aplicación previas del elemento.

Aunque las relaciones entre el rendimiento del cultivo y las concentraciones de nitrato presentes en el suelo fueron relativamente bajas, fue posible detectar un nivel crítico para N-NO_3^- en las capas 0-20 y 0-40 cm que podría ser empleado para separar áreas con probabilidad de respuesta a la aplicación de N.

1.2. Respuesta del maíz al contenido de N mineral en el suelo

Con base en las relaciones entre el rendimiento del maíz y las concentraciones del N inorgánico en el suelo anteriormente discutidas, se determinó el nivel crítico de concentración de Nmin ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) para las profundidades 0-10, 0-20 y 0-40 cm, en relación al rendimiento relativo (RR) por medio del modelo lineal-meseta (Figura 8). El RR fue estimado dividiendo cada valor del rendimiento del maíz de los tratamientos con 0 kg ha^{-1} entre el promedio del rendimiento máximo obtenido en cada parcela principal.

El modelo lineal-meseta, explicó el 60% ($P<0,05$) y 46% ($P<0,05$) de la variabilidad en el rendimiento del cultivo con 0-20 y 0-40 cm, respectivamente.

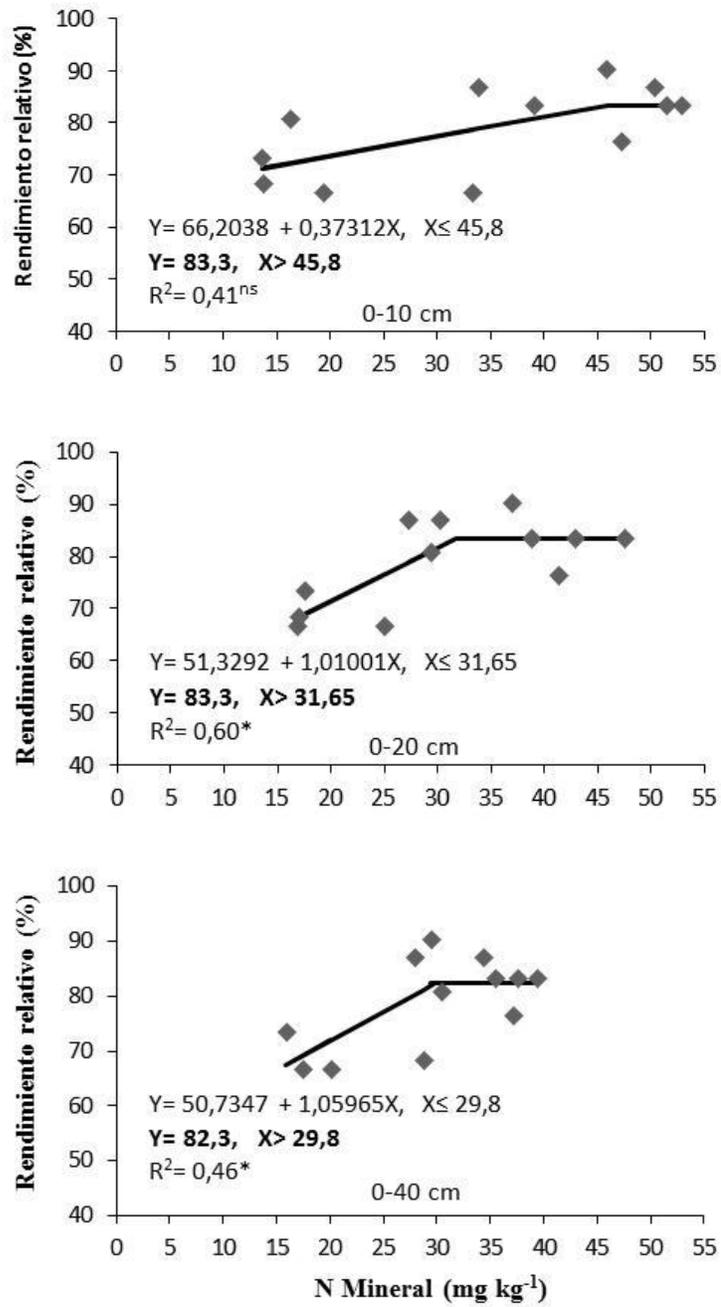


Figura 8. Relación entre rendimiento relativo para los tratamientos con 0 kg N ha⁻¹ y la concentración de N mineral inicial del suelo a diferentes profundidades del suelo.

Para el N mineral a los 0-10, 0-20 y 0-40 cm de profundidad se obtuvo que cuando la concentración de N_{min} inicial en el suelo es menor de 45,8; 31,7 y 29,8 mg kg⁻¹, respectivamente, RR es de 82 y 83%.

La concentración crítica de N mineral en el suelo determinada por medio del modelo lineal-meseta, ha sido muy utilizada en la literatura, para estimar el nivel crítico y la dosis óptima del fertilizante nitrogenado, por mostrar mejor capacidad para estimar el requerimiento de N, debido a sus resultados más apropiados desde el punto de vista agronómico y a la mayor practicidad relacionada con la facilidad para interpretar el punto máximo (*x*) (Bundy y Malone, 1988; Binford *et al.*, 1992a; Barbieri *et al.*, 2009).

Los valores críticos obtenidos, mostraron diferencias y disminuyeron con el aumento de la profundidad del suelo, lo cual es debido a que la concentración de N_{min} decrece en los espesores más profundos como se indicó anteriormente.

El coeficiente de regresión más alto (0,60; P<0,05), correspondió al N_{min} de 0-20 cm, seguido (0,46; P<0,05) por el N_{min} de 0-40 cm de profundidad. De acuerdo con lo anterior, el modelo obtenido para la concentración de N_{min} a 0-20 cm de profundidad describió mejor la respuesta del cultivo, tanto desde el punto de vista estadístico, debido a que es un valor de referencia en estudios de fertilidad a nivel de campo, como práctico porque es la profundidad de muestreo recomendada con fines de diagnóstico de la fertilidad del suelo para el maíz.

Las concentraciones críticas (31,65 y 29,8 mg kg⁻¹) estimadas en el presente estudio para las profundidades de 0-20 y 0-40 cm, respectivamente, se encuentran dentro de los rangos de 33 a 58 mg kg⁻¹ y 37 a 26 mg kg⁻¹ señalados por Schröder *et al.* (1998) y Binford *et al.* (1992a) para 0-30 y 0-60 cm, respectivamente; y están en el mismo orden de magnitud a lo obtenido por Delgado (2002a) con un valor de 40 mg kg⁻¹ para 15 suelos agrícolas de Venezuela, en ensayos a nivel de invernadero. El autor señala, que el maíz respondió de manera distinta a la aplicación de N, debido a las diferencias reportadas en cuanto a la capacidad de suplencia de N mineral en los suelos evaluados.

Niveles críticos del N_{min} de 24, 24 y 20 mg kg⁻¹, para las profundidades de 0-10, 0-15 y 0-30 cm, respectivamente y desde 8 hasta 18 mg kg⁻¹ a 0-15 cm profundidad, fueron señalados para los cultivos de trigo y cebada (Holford y Doyle, 1992; Santos *et al.*, 2009). Estos autores afirman que con concentraciones por debajo del nivel crítico, se obtuvieron rendimientos muy bajos, lo que evidencia la baja disponibilidad de N y la posibilidad de usar estos valores como base para un modelo de recomendación de fertilización nitrogenada.

Los resultados revelaron que el muestreo hasta los 20 cm mostró mejor relación con la respuesta del cultivo, esto posiblemente esté asociado a la mayor proporción del sistema radicular del maíz, el cual normalmente se ubica entre los primeros 20 ó 40 cm del perfil del suelo, como lo indica Delgado *et al.* (2008).

1.3 Dosis máxima y disponibilidad de N en el suelo

En las Figuras 9 y 10 se muestra la relación del rendimiento de las distintas dosis de N aplicadas en relación al máximo rendimiento observado, en porcentaje (%Rend. Máx) y el N disponible (Dosis de N aplicada mas N_{min} suelo) al momento de la siembra, para 0-10, 0-20 y 0-40 cm de profundidad y los valores máximo de N disponible (ND) estimados mediante la primera derivada de la función cuadrática (Figura 9) y el modelo lineal-meseta (Figura 10).

El modelo cuadrático se ajustó mejor a los datos con coeficientes de determinación desde 0,53 (P<0,01) hasta 0,60 (P<0,01) de acuerdo a la profundidad evaluada, mientras que en el modelo cuadrático-meseta variaron desde 0,50 (P<0,01) hasta 0,55 (P<0,01). Para las profundidades más superficiales (0-10 y 0-20 cm), el grado de significancia fue mayor y el mismo disminuyó al incluir una profundidad mayor a 20 cm. Se presume que estos resultados estén asociados a que las mayores reservas de N disponible están en los 0-20 cm de suelo, al igual que la mayor cantidad de raíces del cultivo de maíz, las cuales están en mayor proporción hasta los 30 cm de profundidad (Delgado, 2001 y D'Andréa *et al.*, 2004). No obstante, algunas investigaciones señalan que el muestreo en toda la profundidad que corresponde con el sistema radical no es necesario, si el N_{min} en los primeros centímetros de profundidad se asocia con la respuesta del cultivo (Hergert, 1987).

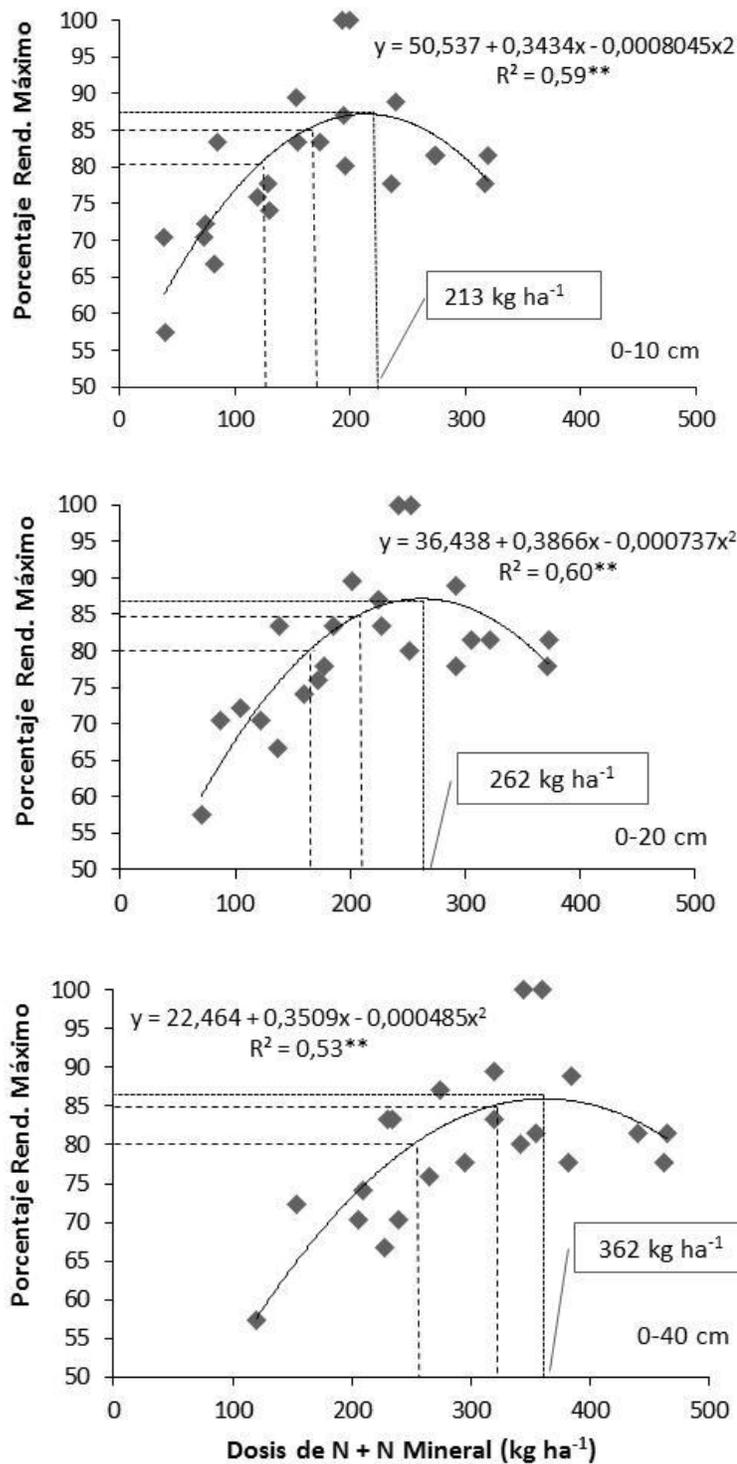


Figura 9. Relación entre el Porcentaje de Rendimiento Máximo del maíz y las dosis de N más N mineral del suelo previo a la siembra, ajustado por el modelo de regresión cuadrática.

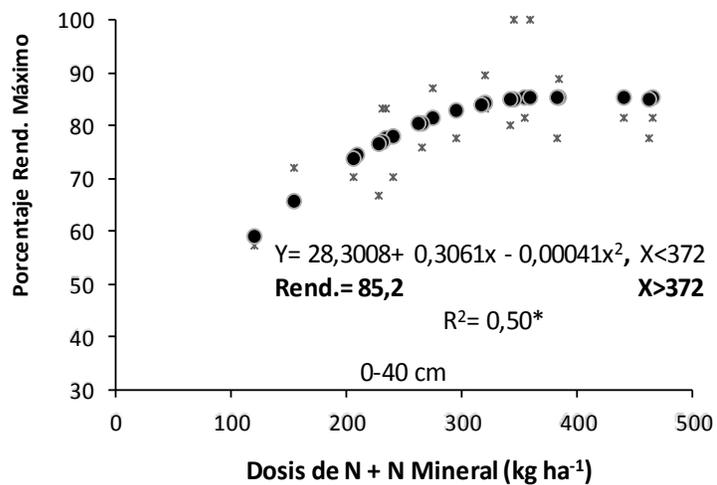
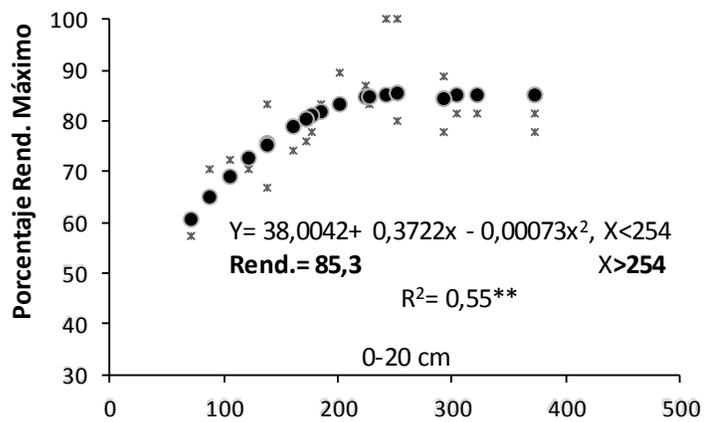
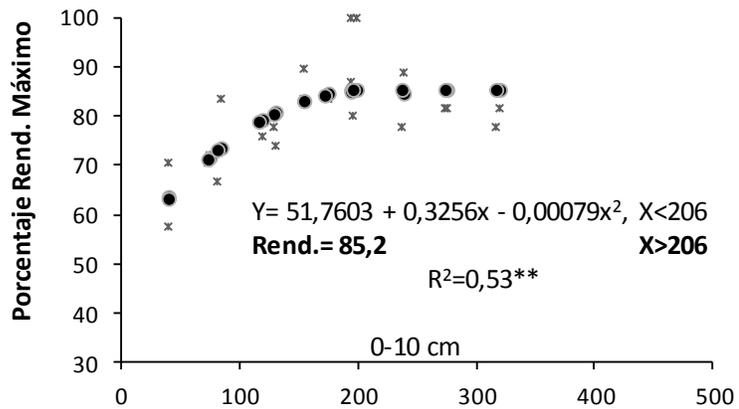


Figura 10. Relación entre el Porcentaje de Rendimiento máximo del maíz y las dosis de N más N mineral del suelo previo a la siembra ajustado con el modelo cuadrático-meseta.

Los valores máximo de N disponible para lograr el 87 y 86 % del rendimiento máximo fueron de 213, 262 y 362 kg N ha⁻¹ para 0-10, 0-20 y 0-40 cm, respectivamente, obtenidos mediante la primera derivada de la función (Figura 9). Estos valores fueron superiores a los determinados mediante los modelos cuadrático-meseta, 206, 254 y 372 kg N ha⁻¹ (x) para 0-10 y 0-20 cm, respectivamente, aunque 372 kg N ha⁻¹ para 0-40 cm fue superior al obtenido por el modelo cuadrático (Figura 10). Estos contenidos guardan semejanza con lo señalado por Delgado (2001) para algunos suelos venezolanos con valores de 188, 250 y 230 kg N ha⁻¹ a los 0-20 cm de profundidad. Al respecto, González-Torres *et al.* (2009) registraron un valor de 325 kg ha⁻¹ de N requerido (Dosis de N + N-residual de 0-30 cm) para el 95% del RR en materia seca de maíz forrajero

Contenidos menores a los obtenidos en el presente estudio fueron encontrados por Salvagiotti *et al.* (2002a), a través del ajuste lineal-meseta, con un umbral crítico de N disponible (N-NO₃⁻ más N fertilizante) a la siembra, de 126 kg ha⁻¹ en los primeros 20 cm de profundidad, para el sur de Santa Fé, Argentina.

Spargo *et al.* (2009) mostraron rangos desde 20 hasta 57 y desde 35 hasta 118 kg ha⁻¹ para N-NO₃⁻ a 0-90cm, donde el cultivo de maíz respondió o no, respectivamente, a la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Este índice generalmente es usado por considerar el N residual del cultivo anterior.

Al comparar los niveles máximos de ND obtenidos por ambos modelos, el modelo cuadrático generó un valor de ND mayor en 7 y 8 kg N ha⁻¹ para 0-10 y 0-20 cm, respectivamente, a los conseguidos por el modelo cuadrático-meseta; mientras que al considerar la profundidad de 0-40 cm éste último superó en 10 kg N ha⁻¹ el valor obtenido por el modelo de regresión cuadrática.

Los modelos cuadráticos, muy utilizados en estudios que describen el rendimiento del cultivo en función de las dosis de fertilización aplicadas, tienden a sobreestimar la dosis cuando el punto de inflexión es considerado como la mejor dosis (Silva *et al.*, 2007), debido a que de la derivada de la función se obtiene el valor de concentración de N en el suelo asociado al máximo porcentaje de rendimiento. Mientras que el modelo cuadrático-meseta es práctico, porque una vez que calcula el

punto de quiebre entre la respuesta lineal y de meseta, la respuesta a la aplicación de N se hace poco variable (Rezende *et al.*, 2007).

Las diferencias obtenidas entre los modelos utilizados para determinar el máximo ND no se consideraron suficientes para preferir un método sobre el otro. Sin embargo, los criterios utilizados para escoger el mejor modelo deben estar basados en la significancia de los coeficientes de determinación (R^2) y los parámetros de regresión. Por lo anteriormente expuesto, el modelo cuadrático fue el seleccionado por los valores R^2 alcanzados y su nivel de significancia. De esta manera, la profundidad de 0-20 cm fue la más recomendada para estimar la dosis y evaluar la disponibilidad de N en el suelo, por presentar un mayor coeficiente de determinación (0,60; $P < 0,01$).

1.4 Estimación de la Dosis de N

Para la aplicación práctica de los resultados anteriormente obtenidos, es necesario convertir los niveles máximos de N disponible asociados al % de Rend. Máx, en dosis de N o recomendación de fertilización.

El N disponible aumenta con el rendimiento del cultivo del sitio o localidad. Esto se debe a que este elemento, especialmente los nitratos en la solución del suelo, se mueven hacia las raíces por flujo de masa. Por lo tanto, sitios donde el cultivo tiene bajos rendimientos satisface sus requerimientos de nitrógeno con menores niveles de disponibilidad en el suelo, que en sitios donde el rendimiento y requerimiento son mayores (Álvarez *et al.*, 2012).

Por lo señalado en los párrafos anteriores, se propone establecer categorías de respuesta del maíz en función del N disponible para las profundidades evaluadas. Esto significaría que alta, media y baja probabilidad de respuesta está relacionada con rendimientos máximos menores al 80%, desde 80 hasta 85% y mayores al 85%, respectivamente, tal como se ilustra en los modelos de regresión cuadrática a las distintas profundidades (Figura 9). Las ecuaciones generadas permitieron estimar el N disponible para las categorías de respuesta establecidas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Probabilidad de respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada en función de la disponibilidad de N en el suelo en diferentes profundidades.

Profundidad (cm)	Probabilidad de respuesta a la aplicación de N		
	Alta (<80%)	Media (80-85%)	Baja (>85%)
	Disponibilidad de N (kg ha ⁻¹)		
0-10	< 119	≥ 119 - 161,4	> 161,4
0-20	< 164	≥ 164 - 208,5	> 208,5
0-40	< 252	≥ 252 - 320,0	> 320,0

El ND definido como la suma del N mineral inicial de una capa determinada de suelo $N_{min_{(prof)}}$ más la dosis de N aplicada (D) asociada a un % de Rend. Máx, ha sido usado como criterio para estimar dosis de fertilizantes (Fontes y Araujo, 2007), como lo indica la Ecuación 1:

$$ND = D + N_{min_{(prof)}} \quad (1)$$

$$\text{Despejando, } D \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = ND \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} - N_{min_{(prof)}} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Así que, para estimar la dosis de N a recomendar, es necesario establecer con antelación la profundidad de muestreo a la cual se realizará la determinación del contenido de N mineral inicial, la densidad aparente del suelo y el rendimiento máximo que se desea o se pueda alcanzar para definir la probabilidad de respuesta de acuerdo a las categorías establecidas (alta, media y baja).

Ejemplificando, para obtener la dosis se procede de la siguiente manera: a) se realiza un muestreo a 0-20 cm, profundidad que mostró la mayor relación con el rendimiento del cultivo, para cuantificar la concentración del N_{min} inicial, extraíble en KCl 2M; b) se determina la densidad aparente de suelo (1,6 Mg m⁻³) para estimar el peso total de una hectárea a fin de obtener el N_{min} en kg ha⁻¹; c) se selecciona el ND, de acuerdo al % de Rend. Máx (Ej. 83%) y que corresponde con la categoría establecida. En este caso el ND seleccionado (164 - 208,5) para una probabilidad media fue 186,25 kg ha⁻¹ (Cuadro 2).

$$\text{Resumiendo, la } D \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 186 \text{ kg ND ha}^{-1} - N_{mineral_{(0-20)}} \text{ kg ha}^{-1}$$

El INIA (2005), con base en los trabajos de Delgado (2001), presentó la determinación de dosis de N para maíz, según la Ecuación (1), para un suelo

Fluventic Haplustolls del estado Aragua, según la cual el N disponible es la cantidad de N mineral extraíble en KCl (2M) a los 0-30 cm de profundidad:

Otros investigadores como Schröder *et al.* (1998) presentan una propuesta similar en suelos arenosos para determinar las dosis recomendadas de N (kg ha^{-1}) para maíz a 0-30 y 0-60 cm.

Esta propuesta, presenta la ventaja de estimar, de una manera relativamente sencilla, las dosis de fertilizantes nitrogenados, con base en el contenido de N mineral al momento de la siembra y a 0-20 cm de profundidad para el sitio específico.

2. Contenidos de N inorgánico en el suelo en la fase de cinco y seis hojas del cultivo y respuesta del maíz (% Rendimiento máximo) a la aplicación de N

Las concentraciones de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y N mineral desde 0 hasta 40 cm y obtenidos por cada profundidad de suelo (0-10, 10-20 y 20-40 cm) en la fase de cinco a seis hojas totalmente expandida (V5-V6), fueron afectados significativamente ($P < 0,05$) por las dosis de N aplicadas y la profundidad de muestreo. Para profundidad de 0-10 cm las concentraciones de N-NO_3^- ($37,18 \text{ mg kg}^{-1}$) y Nmin ($53,28 \text{ mg kg}^{-1}$) fueron superiores con respecto a las de 10-20 y 20-40 cm, en la que se obtuvieron $28,72$ y $25,42 \text{ mg kg}^{-1}$ de N-NO_3^- y $45,75$ y $43,68 \text{ mg kg}^{-1}$ de Nmin, respectivamente (Apéndice II-4).

Los cambios en las concentraciones de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y Nmin desde la siembra hasta los 28-30 días después de la siembra (el rebono), fase de V5-V6 del maíz, fueron moderados y reflejan que la aplicación del fertilizante nitrogenado al momento de la siembra (1/3 de la dosis) produjo acumulación en las concentraciones de nitrato y amonio, producto de la disociación del fertilizante aplicado (Apéndice II-3 y 4). Tendencias parecidas fueron encontradas por Da Ros *et al.* (2003), al fraccionar la fertilización nitrogenada desde la siembra hasta estado de cuatro hojas en maíz.

Rambo *et al.* (2008) obtuvieron valores menores de concentración de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y Nmin en el suelo hasta $16,1$; $19,2$ y $33,4 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente, a 0-30 cm de profundidad, con dosis desde 0 hasta 300 kg N ha^{-1} . Esto probablemente esté

relacionado con las actividades potenciadas de las bacterias nitrificantes del suelo en el período desde la siembra hasta la etapa V5-V6, debido al aumento de la aireación del suelo y a una reducida saturación de humedad (85% de capacidad de campo), lo que permitió el proceso de nitrificación (Videla *et al.*, 2005).

Con el fin de verificar la relación entre la concentración de N en el suelo en la fase de V5-V6 y el porcentaje de rendimiento máximo del maíz, se realizaron análisis de regresión, esta relación fue mejor descrita usando el modelo lineal-meseta (Figura 11 y 12). Para las diferentes capas de suelo (0-10, 0-20 y 0-40) se observó que la concentración de N-NO_3^- explicó del 47 a 49 % de la producción de grano del maíz y mostró mayor relación para profundidad de 0-20 cm, aunque en ningún caso la concentración de N-NH_4^+ (Figura 11). Este último mostró mayor coeficiente de variación (32,2 %) con respecto al nitrato (26,6 %) y Nmin (30,08%) (Apéndice II-4) y se mantuvo semejante en todo el perfil del suelo muestreado, esto puede estar relacionado con las transformaciones en el suelo, es decir la oxidación biológica del amonio a nitrato y la tasa de mineralización y nitrificación ocurrida durante el periodo previo al muestreo (Dresler *et al.*, 2011).

Los coeficientes de determinación obtenidos fueron inferiores a los indicados por Binford *et al.* (1992b), quienes señalaron que fluctuaban entre 0,61 y 0,76 en relación al rendimiento absoluto y relativo, respectivamente, con la concentración de N-NO_3^- en suelo cuando las plantas de maíz presentaban 15 a 30 cm de altura.

La consideración conjunta del $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ (N mineral) mejoró el coeficiente de determinación a 0,69 ($P < 0,01$) para la profundidad de 0-10 cm; mientras que no lo afectó para 0-20 cm y no mostró ajuste ($P < 0,05$) al modelo lineal-meseta para la profundidad de 0-40 cm (Figura 12). Esto último, podría atribuirse a la mayor dispersión del N-NH_4^+ para esta profundidad. Resultados semejantes fueron encontrados por Rozas *et al.* (2000), quienes observaron que la inclusión del contenido de amonio no aumentaba significativamente la confiabilidad de los datos del Nmin. Sin embargo, se observó que la inclusión del N-NH_4^+ mejoró los coeficientes de determinación de los modelos de regresión, por lo que su evaluación mediante el N mineral del suelo fue considerada.

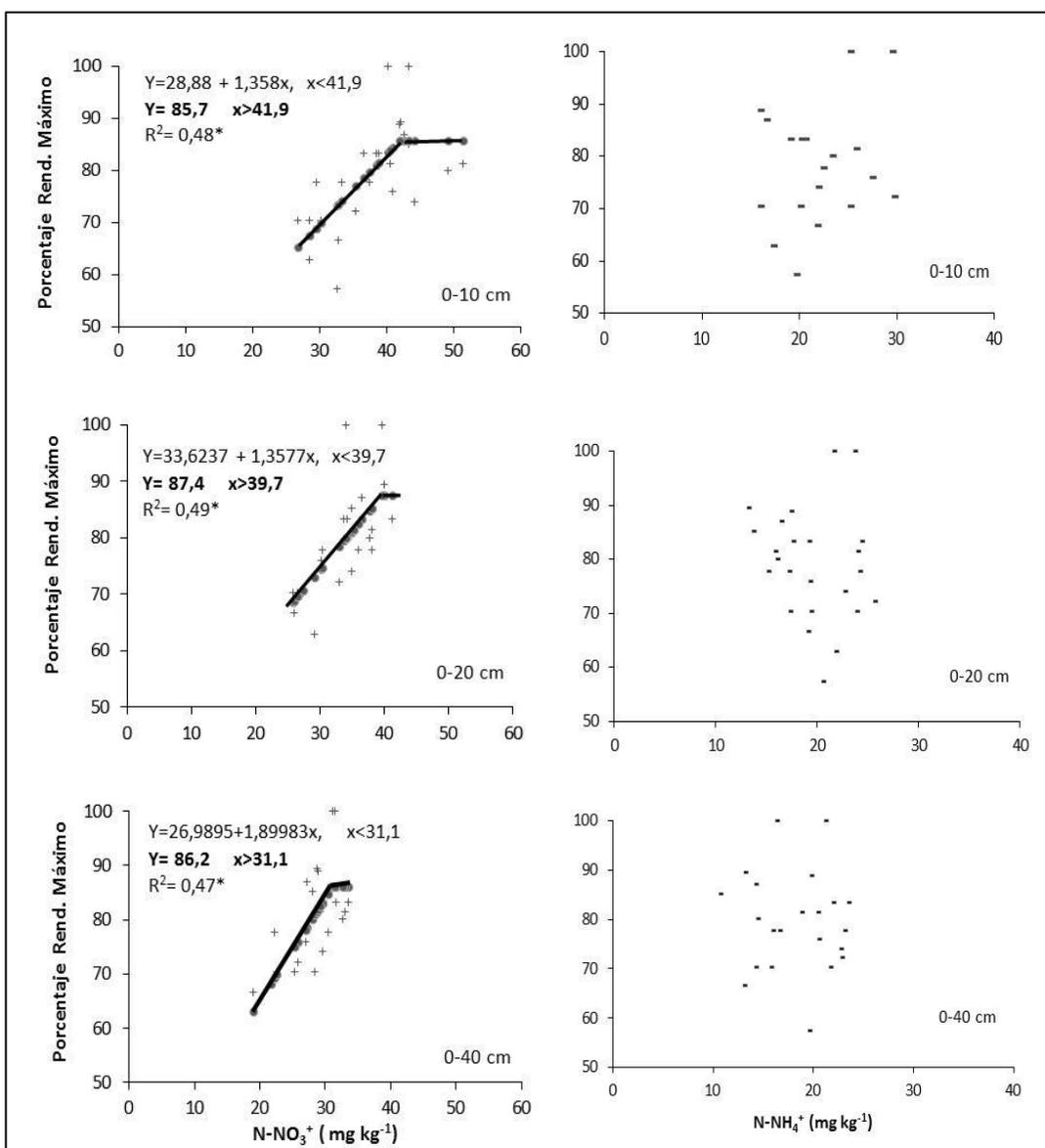


Figura 11. Rendimiento del maíz en función de las concentraciones de N inorgánico en el suelo en la fase V5-V6 del cultivo.

Este resultado es concordante con lo propuesto por Binford *et al.* (1992b) y Rambo *et al.* (2007a) quienes indican que el N-NH₄⁺ debe ser estimado, en condiciones de intensas precipitaciones, como ocurre en la zona de estudio durante la etapa de desarrollo vegetativo del maíz (V5-V6 hasta V12), y en suelos que reciben fuentes de N amoniacal.

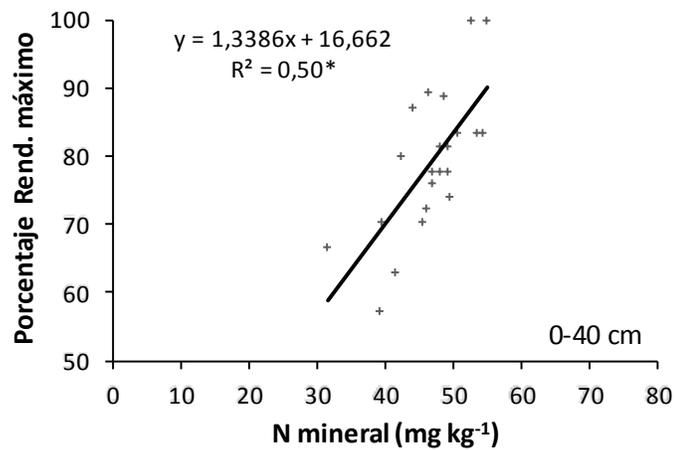
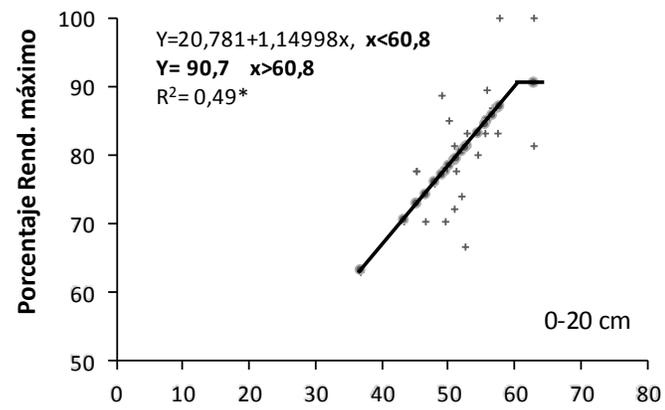
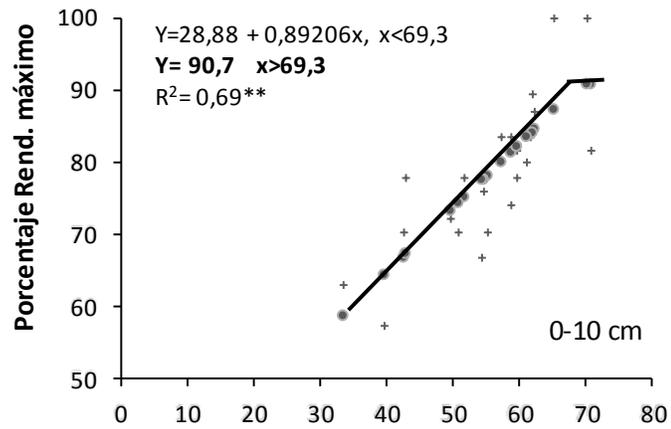


Figura 12. Relación del porcentaje de rendimiento máximo y la concentración de N mineral en las capa 0-10, 0-20 y 0-40 cm en la fase de V5-V6 del maíz.

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran semejanza con los conseguidos por Rambo *et al.* (2007a), quienes lograron coeficientes de determinación de 0,51, 0,53 y 0,56 para respuestas cuadrática del rendimiento de grano, en relación a los contenidos de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y Nmin del suelo, respectivamente, evaluados en la fase V5-V6.

Con base en la relación entre el porcentaje de rendimiento del maíz y el nitrógeno inorgánico en el suelo, se estableció el nivel crítico de N en el suelo, representado por los valores de x de las ecuaciones generadas en las Figuras 11 y 12.

Estos valores críticos, en la fase V5-V6 del cultivo, permiten diagnosticar que suelos con un nivel menor a estos, la probabilidad de respuesta del maíz a la aplicación del elemento, sería mayor. Además, pueden servir como base para ajustar la dosis de N a ser aplicada, considerando cada unidad de concentración del N (N-NO_3^- y/o N-min) por debajo al nivel crítico.

Los niveles críticos de N-NO_3^- en el suelo correspondieron a 41,9, 39,7, y 31,1 mg kg^{-1} a los 0-10, 0-20 y 0-40 cm de profundidad, respectivamente. Estos valores fueron superiores al nivel de 29 mg kg^{-1} a 0-30 cm encontrados por Binford *et al.* (1992b), Bianchini *et al.* (2004) y Rambo *et al.* (2007a). Así mismo, al valor de 25 mg kg^{-1} de N-NO_3^- a 0-20, por debajo del cual se observó respuesta a la fertilización nitrogenada para la fase de V5-V6 del maíz (Rozas *et al.*, 2000 y Spargo *et al.*, 2009).

Los niveles críticos de N mineral en suelo, variaron de 69,3 a 60,8 mg kg^{-1} para los 0-10 y 0-20 cm de profundidad, respectivamente (Figura 12). Al respecto, Binford *et al.* (1992b) obtuvieron concentraciones críticas para Nmin desde 23 hasta 76 mg kg^{-1} a 0-30 cm para el maíz con 15 a 30 cm de altura, que al agruparlos por sitios y años obtuvieron valores de 37 a 41 mg kg^{-1} , los cuales están por debajo de los obtenidos en el presente estudio.

En general, los niveles críticos de N-NO_3^- y Nmin disminuyeron con el aumento de la profundidad muestreo, tendencia que confirma lo conseguido por Rambo *et al.* (2004).

2.1. Rendimiento en grano del cultivo y disponibilidad de N en el suelo en la fase V5-V6.

En la Figura 13 se muestra la relación del rendimiento en grano expresado como porcentaje de rendimiento máximo y el contenido de N disponible (N-NO_3^- más $2/3$ de la dosis de N ($D_{2/3}$) a aplicar en el reabono, y en la Figura 14 el %Rend. Máx con el Nmin del suelo más $D_{2/3}$ por aplicar en el reabono, en la etapa V5-V6 del maíz, para las capas 0-10, 0-20 y 0-40 cm, con el fin de establecer la dosis de N en el reabono. Dado que el N-NH_4^+ no presentó relación significativa con el rendimiento (Figura 11), su evaluación no se realizó individualmente.

Los contenidos de ND en forma de $\text{N-NO}_3^- + D_{2/3}$ a aplicar explicaron hasta un 58% la variabilidad del Rend. Máx del maíz, tendencia que se mantuvo cuando se consideraron las profundidades del suelo hasta 40 cm; mientras que el ND en forma de $\text{Nmin} + D_{2/3}$ explicó desde 45 hasta 61% la variabilidad del rendimiento (Figura 14). Sin embargo, este último disminuyó para las profundidades inferiores, contrario a lo observado con la sola consideración de N-NO_3^- , tendencia que coincide con lo obtenido por Holford y Doyle (1992) quienes indicaron una mejor relación para las profundidades superficiales 0-15 y 0-30 cm y en el cual el grado de ajuste no mejoró con los muestreos más profundos.

Rambo *et al.* (2007a) obtuvieron relaciones significativas entre el rendimiento del maíz y los contenidos de nitratos, con coeficientes de determinación significativos entre 0,4 y 0,5, que incrementaron a 0,48 y 0,56, con la consideración de todo el ND hasta 30 cm, en la etapa V5-V6 del maíz en dos años de estudio.

En sus estudios, Barbieri *et al.* (2009) encontraron una relación significativa (R^2 de 0,80) entre el rendimiento relativo del trigo y los contenidos de ND hasta los 60 cm profundidad en la etapa de macollaje, por lo que indican la necesidad de realizar el diagnóstico del requerimiento de N en esta etapa del cultivo, como estrategia apropiada para mejorar la eficiencia de utilización del N.

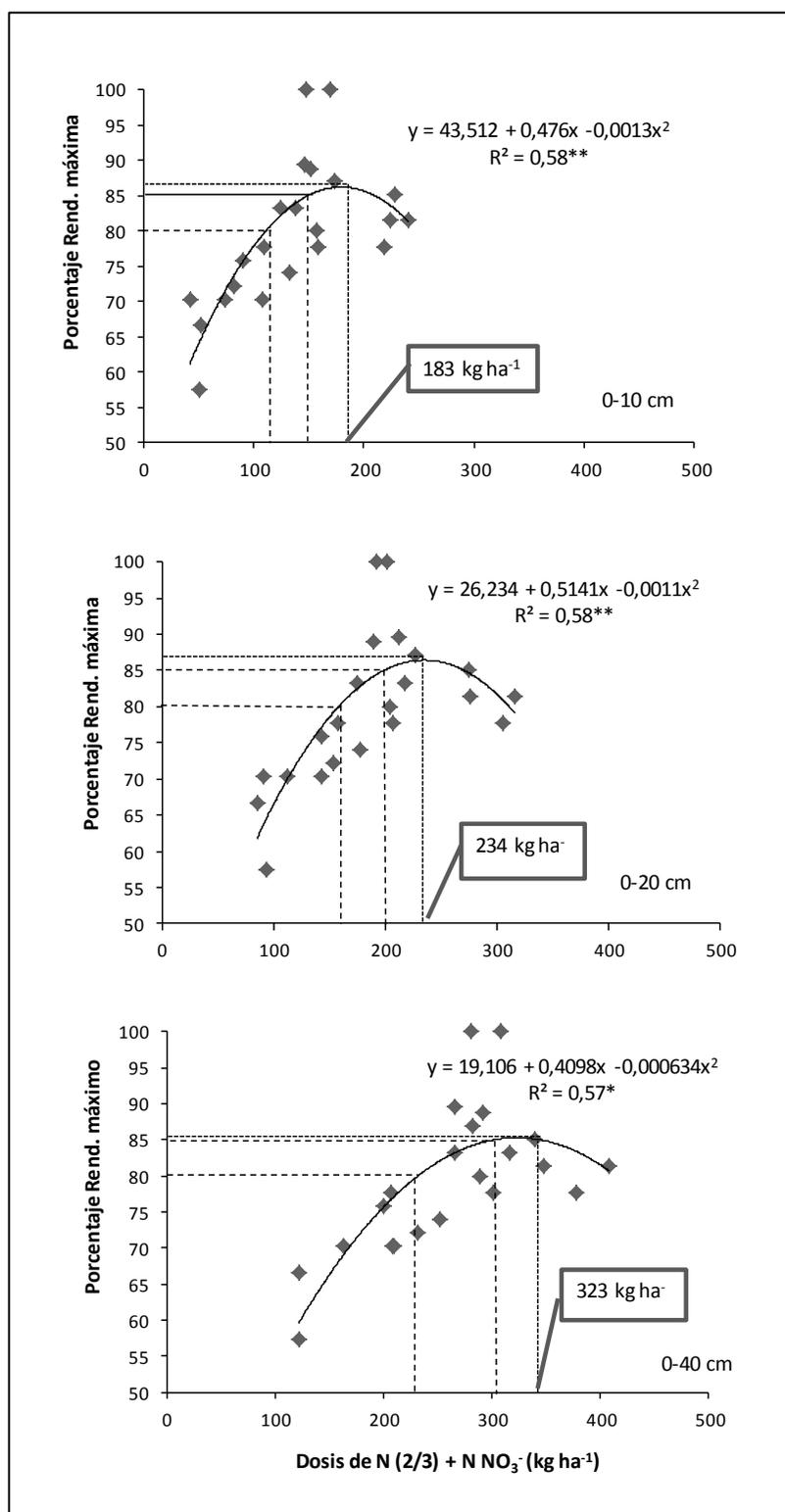


Figura 13. Relación entre el porcentaje de rendimiento máximo del maíz y el N disponible (2/3 de la dosis de N más N-NO₃⁻) en la etapa V5-V6 del cultivo.

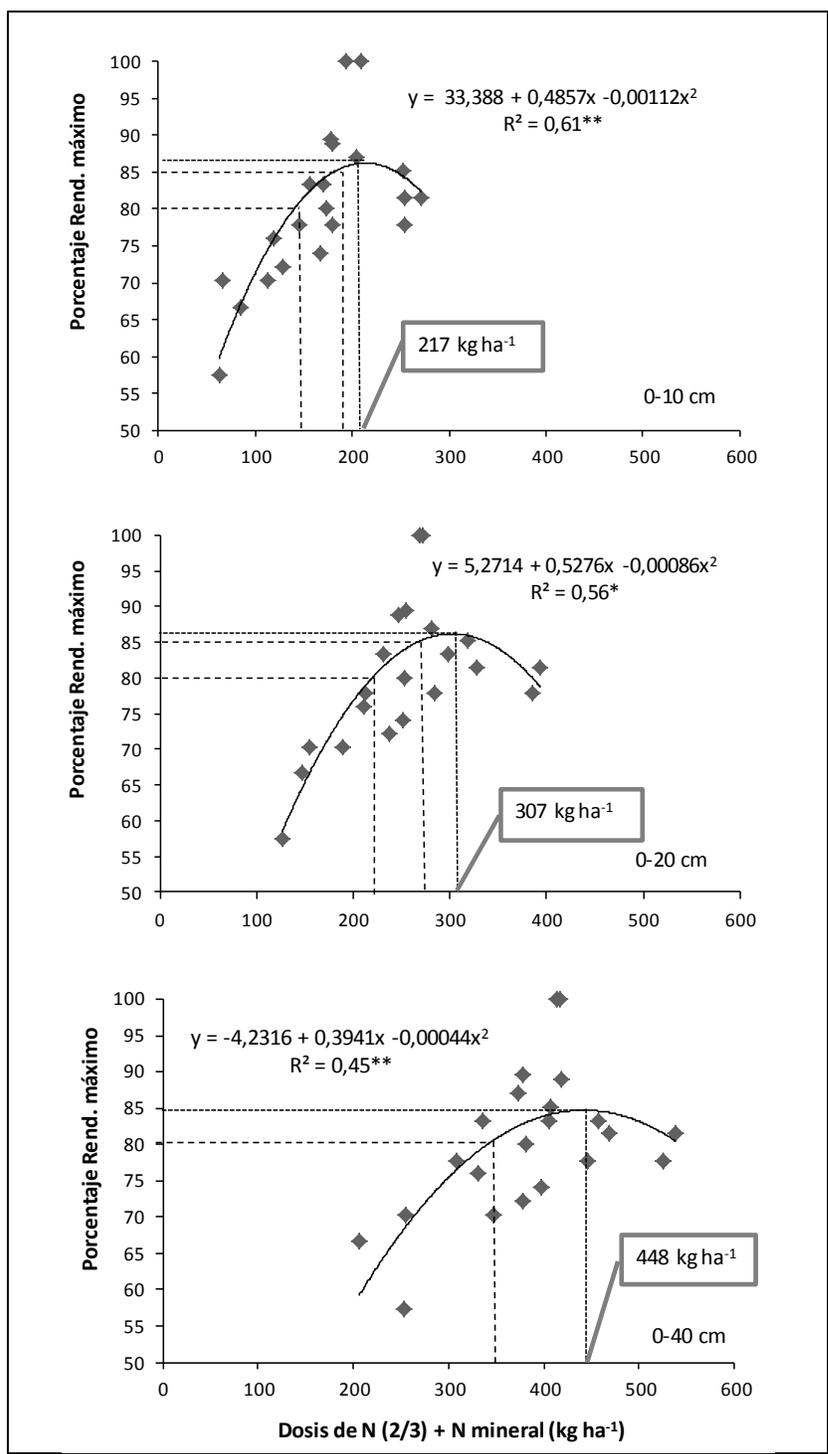


Figura 14. Relación entre el porcentaje de rendimiento máximo del maíz y el N disponible (2/3 de la dosis de N más N mineral del suelo) en la etapa V5-V6 del maíz.

Los niveles de ND como $N-NO_3^- + D_{2/3}$, por encima del cual no se lograron %Rend.Máx superiores a 87 a 89%, variaron desde 183 hasta 323 kg ha⁻¹, para las profundidades entre 0-10 y 0-40 cm, respectivamente (Figura 13). Estos valores son semejantes a los niveles de N requeridos de 225 kg ha⁻¹ reportado por Miransari y Mackenzie (2011) y de 365 kg ha⁻¹ a 0-30 cm obtenido por Rambo *et al.* (2007a).

Un nivel de disponibilidad de N de 162 kg ha⁻¹ a 0-20 para el maíz en estado temprano (V3-V4) bajo siembra directa, por encima del cual no se lograron RR superiores al 94% fue obtenido por Mistrorigo y Valentinuz (2004).

Con respecto al ND requerido en forma de Nmin mas $D_{2/3}$ para lograr un %Rend.Máx de 86% fue de 216, 307 y 448 kg ha⁻¹ para las profundidades de 0-10, 0-20 y 0-40 cm, respectivamente (Figura 14). Este requerimiento de ND aumentó con respecto al incremento de la profundidad de muestreo.

En general, el ND (dosis + $N-NO_3^-$) en la etapa de V5-V6 del maíz mostró mayor relación con el rendimiento del cultivo (Figuras 11 y 13), resultado que confirma lo conseguido por Magdoff (1991) con la prueba de pre-aplicación de N en la etapa de desarrollo del cultivo .

En relación al contenido de Nmin del suelo, mostró potencial para predecir en la etapa de mayor demanda nutricional (V5-V6) del maíz una disminución del rendimiento del cultivo, debido a que las concentraciones del N en el suelo se mantuvieron en las etapas de mayor requerimiento del elemento, tendencia que fue confirmada por Da Ros *et al.* (2003).

Las relaciones significativas obtenidas en el presente estudio, entre el % Rend. Máx. y el ND en forma de $N-NO_3^-$ y Nmin indican que los muestreos en la fase V5-V6 fueron adecuados para el maíz. Además, debido a que los valores de R^2 no difieren para las profundidades de 0-10 (0,61, $P < 0,01$) y 0-20 cm (0,56, $P < 0,05$), por lo que la profundidad hasta 0-20 cm, podría ser utilizada para muestreo en esta etapa de desarrollo del cultivo, por ser económicas y consumir menos tiempo. Afirmación que coincide con lo señalado por Miransari y Mackenzie (2011).

2.2. Estimación de la Dosis de N en la fase V5-V6 del maíz

Previo a la estimación de la dosis de N a aplicar, se propone el uso de rangos de ND para la fase V5-V6 del cultivo en función del porcentaje de rendimiento que se desea alcanzar y acuerdo a la probabilidad de respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada. Estos rangos pueden determinar el grado de limitación del elemento al rendimiento del cultivo y ser la base para estimar el requerimiento de fertilizantes nitrogenados.

Los rangos de disponibilidad de N para cada profundidad de suelo, que separan los niveles de ND en el suelo en bajo, medio y alto, de acuerdo a la probabilidad de respuesta (hasta un 80, desde 80 hasta 85 y mayores de 85% del rendimiento máximo, respectivamente) se establecieron para el $N\text{-NO}_3^-$ y Nmin (Cuadro 3) utilizando las ecuaciones generadas en las Figuras 13 y 14.

Para el establecimiento de la dosis de N a partir de los contenidos de ND en el suelo en la etapa V5-V6 del maíz y su relación con el % Rend. Max, se empleó el procedimiento descrito previamente (Acápite 1.4):

$$D \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{ND(kg ha}^{-1}\text{)} - N \text{ min}_{(\text{prof})} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Si por ejemplo, el índice de diagnóstico es el $N\text{-NO}_3^-$ o el Nmin a 0-20 cm, el ND requerido para alcanzar el 85% de rendimiento máximo sería de 200,3 y 269,5 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). Se ejemplificó con esta profundidad por ser el que presenta la mayor relación con la densidad radicular del cultivo y además de ser el más recomendado con fines de fertilidad.

La dosis a recomendar se estimaría con el ND requerido (200,3 y 269,5 kg ha⁻¹, para $N\text{-NO}_3^-$ y Nmin, respectivamente) y los contenidos de N (NO_3^- o Nmin) en el suelo por determinar, a la profundidad seleccionada, en la fase V5-V6, la cual queda expresada de la siguiente manera:

$$D \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 200,3 \text{ kg ha}^{-1} - N\text{-NO}_3^-_{0-20} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} \text{ en la fase V5-V6 del maíz}$$

$$D \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 269,5 \text{ kg ha}^{-1} - N\text{min}_{0-20} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} \text{ en la fase V5-V6 del maíz.}$$

Criterios semejantes al propuesto en el presente estudio han sido planteados por Ferrer *et al.* (2003). Estos autores establecieron dos valores de ND, a 0-30 cm de profundidad del suelo con densidad igual a 1,55 g cm³, de 210 kg ha⁻¹ (45 mg kg⁻¹)

para 82% de %Rend. Máx. y 380 kg ha⁻¹ (82 mg kg⁻¹) para producción máxima y estimaron la Dosis (kg ha⁻¹) en 210 kg ha⁻¹ menos el contenido de N-NO₃ a 0-30 cm.

Por su parte, Rambo *et al.* (2007a) establecieron con base en el nivel crítico de concentración de N-NO₃ (20 mg kg⁻¹ a 0-30 cm), que sería necesario aplicar 50 kg ha⁻¹ por cada unidad de concentración de N-NO₃⁻ en el suelo, medido en la fase V6, menor al nivel crítico establecido. Estos autores concluyen que el contenido de N-NO₃⁻ en el suelo, para la etapa V6 del maíz y previo a la segunda fertilización, tiene potencial para ser utilizado como indicador complementario de la disponibilidad de N en el suelo.

Cuadro 3. Probabilidad de respuesta del maíz en la etapa V5-V6 a la fertilización nitrogenada en función de la disponibilidad de N como contenidos de N-NO₃ y N mineral a diferentes profundidad del suelo mas dosis (2/3) de N.

Profundidad (cm)	Probabilidad de Respuesta del cultivo		
	Alta (<85%)	Media (80-85%)	Baja (>85%)
	Disponibilidad de N- NO₃⁺ (kg ha⁻¹)		
0-10	< 109	≥ 109 - 143	> 143
0-20	< 158	≥ 158 - 200,3	> 200,3
0-40	< 232	≥ 232 - 301	> 301
	N mineral		
0-10	< 143,4	≥ 143,4 – 186,3	> 186,3
0-20	< 222,0	≥ 222,0 – 269,5	> 269,5
0-40	< 352,3	≥ 353,3 – 447,8	> 447,8

Estos modelos y rangos propuestos deben ser repetidos en el tiempo para cubrir una mayor variabilidad ambiental y de manejo que afectan la respuesta del maíz, y que permita su validación en las condiciones donde éstos van a ser utilizados. Además, debe ser considerado el techo de producción deseado en cada situación, por cuanto esta variable engloba todo el manejo que da el agricultor a su cultivo (Ramírez *et al.*, 1988).

V. CONCLUSIONES

1. Los niveles de N aplicados promovieron variaciones significativas en los contenidos de N-NO_3^- , y N mineral ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) y presentaron relación con el rendimiento del cultivo.
2. La concentración de N mineral a 0-20 cm de profundidad fue la que mejor describió la respuesta del cultivo, tanto desde el punto de vista estadístico, como práctico.
3. El N mineral y la suma de éste con el N del fertilizante para predecir el rendimiento del cultivo, mostraron relación con la producción del maíz y permitieron definir rangos de N disponible, al momento de la siembra y en la fase de cinco a seis hojas del maíz, como indicadores de la respuesta del cultivo a la aplicación del elemento.
4. La determinación del contenido de N-NO_3^- o del N mineral en la fase de cinco a seis hojas del maíz puede ser usada para recomendar la dosis de N a aplicar para la obtención de rendimientos máximos.

APÉNDICE

II-1. Precipitación diaria y mensual (mm) del año 2010, registrada en el Estación Climatológica Yaritagua.



Estación: YARITAGUA

Precipitación diaria y mensual

Latitud: 10°02 N **Altitud:** 308 MSNM
Longitud: 69°05W **Año:** 2010

Mes:	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Día			mm		
01	32,4	0,1	0,0	4,1	0,7
02	1,4	12,8	0,9	0,0	0,0
03	0,0	8,8	0,0	0,0	19,4
04	0,0	8,0	7,9	3,3	8,5
05	0,0	0,0	0,0	9,5	15,0
06	0,3	1,3	0,3	0,0	1,4
07	31,2	1,7	0,0	0,0	0,0
08	0,0	0,7	0,0	1,8	18,7
09	0,0	12,9	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,7	0,2	0,1	1,0
11	1,3	0,0	0,0	0,1	1,8
12	0,7	80,6	0,1	0,8	0,0
13	3,0	0,0	0,3	1,7	0,0
14	4,2	5,1	1,7	0,0	0,0
15	15,3	4,4	0,0	0,0	0,1
16	0,0	3,1	0,4	0,0	0,1
17	0,0	12,9	0,0	0,0	0,0
18	4,9	8,9	0,0	0,1	0,0
19	0,0	1,9	0,2	0,0	33,2
20	0,2	0,0	0,0	2,0	0,0
21	10,0	0,0	0,4	0,0	0,0
22	80,6	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0
24	0,8	6,2	8,6	3,7	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0
26	1,5	38,8	1,7	0,0	0,0
27	0,5	6,8	20,8	5,7	0,0
28	11,4	6,5	0,0	7,3	0,0
29	0,2	0,6	0,0	3,2	0,0
30	0,3	30,2	0,0	0,0	0,0
31		0,8	0,6		0,0
MEDIA	6,7	8,2	1,4	1,6	3,2
Total	200,2	253,0	43,5	47,1	99,2

II-2. Evaporación (mm), año 2010, registrada en el Estación Climatológica Yaritagua.



Estación: YARITAGUA

Evaporacion

Latitud: 10°02 N **Altitud:** 308 MSNM
Longitud: 69°05W **Año:** 2010

Mes:	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Día			mm		
01	7,1	5,0	5,6	4,6	4,3
02	1,8	4,5	5,4	7,3	5,0
03	5,5	3,6	3,8	4,7	6,9
04	7,7	6,0	4,7	3,0	3,4
05	6,1	6,2	6,2	6,7	4,8
06	1,9	5,7	5,9	5,7	3,3
07	3,5	2,2	7,0	5,0	6,5
08	4,8	4,4	4,8	4,6	7,1
09	6,1	1,4	6,0	4,3	5,7
10	2,3	4,3	5,7	3,4	6,3
11	5,9	4,7	5,4	3,3	4,3
12	2,8	*11,1	4,2	4,7	6,7
13	5,9	3,4	5,5	5,5	6,6
14	3,2	5,0	5,0	6,5	6,1
15	5,5	4,8	4,3	3,8	4,8
16	3,7	4,2	5,1	7,2	5,7
17	6,4	2,7	6,2	6,8	6,4
18	2,1	2,5	6,5	3,3	5,5
19	5,6	5,3	4,2	6,7	7,1
20	4,7	6,7	5,4	3,0	6,7
21	2,3	5,1	6,3	6,8	5,8
22	1,6	5,9	5,9	4,5	4,6
23	3,0	5,4	5,9	5,8	6,7
24	4,3	6,0	6,2	3,1	6,1
25	5,0	6,8	3,8	1,7	5,5
26	6,3	6,5	3,7	4,8	6,4
27	4,2	3,8	5,7	8,6	7,7
28	6,4	1,5	4,9	2,8	5,1
29	2,4	3,4	5,5	1,6	6,9
30	4,5	7,6	5,8	5,9	7,2
31		3,9	6,4		6,6
MEDIA	4,4	4,6	5,4	4,9	5,9

II-3. Promedio ponderado de la concentración inicial de nitratos (N-NO_3^-), amonio (N-NH_4^+) y N mineral ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) entre 0 y 40 cm de profundidad en los tratamientos aplicado en el 1^{er} año.

Gradiente Kg ha^{-1}	Prof. cm	N (mg kg^{-1})		
		N- NO_3^-	N- NH_4^+	N Mineral
0	0-10	11,82	10,33	22,15 b
150	0-10	11,89	9,44	21,33 b
300	0-10	24,36	22,64	47,00 ab
450	0-10	30,23	18,40	48,63 a
0	0-20	11,09 b	8,71 b	19,80 c
150	0-20	15,37 ab	9,37 b	24,60 bc
300	0-20	19,84 ab	16,47 a	38,85 ab
450	0.20	23,94 a	19,01 ab	40,41 a
0	0-40	9,52 b	8,24 b	17,77 b
150	0-40	17,62 ab	13,59 ab	31,15 a
300	0-40	16,98 ab	15,28 a	34,21 a
450	0-40	19,35 a	17,23 a	34,64 a

Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias entre tratamientos ($P < 0,05$).

II-4. Concentración promedio de N-NO_3^- , NH_4^+ y N mineral ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) en la etapa V5-V6 del ciclo del maíz en los diferentes tratamientos de aplicación de N y promedio para las diferentes profundidades.

Dosis de N (kg ha^{-1})*	Contenido de nitrógeno en el suelo (mg kg^{-1})		
	N- NO_3^-	N- NH_4^+	N mineral
0	27,47	23,01 ab	46,04
40	27,82	19,59 ab	49,13
95	29,40	18,88 ab	47,00
120	34,42	18,52 ab	51,46
160	29,58	17,15 b	44,42
240	31,68	18,04 ab	46,71
Media general	30,62	19,13	47,49
Profundidad (cm)			
0-10	37,18 a	20,48	53,28 a
10-20	28,72 b	18,68	45,75 b
20-40	25,42 b	18,34	43,68 b
C V (%)	26,6	32,17	30,08

*Para esta etapa, se aplicó 1/3 de la dosis de N. Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias entre dosis ($P < 0,05$)

CAPÍTULO III

USO DEL CLOROFILÓMETRO EN EL DIAGNÓSTICO Y ESTIMACIÓN DE LA NECESIDAD DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ

I. INTRODUCCIÓN

El maíz es un cultivo que requiere de un adecuado suministro de N desde las primeras etapas de crecimiento. El conocimiento de la dinámica de acumulación del elemento por el cultivo es importante para el manejo de la fertilización nitrogenada, ya que permite determinar dosis y épocas más adecuadas para su aplicación, que garanticen, enmarcado en el desarrollo de una agricultura sustentable, una eficiente utilización del N y un menor riesgo de contaminación de fuentes de agua.

Para este elemento el cultivo se presenta dos períodos de máxima absorción, durante la etapa vegetativa y el llenado de granos. En Venezuela, para los híbridos de maíz PB-8 y SK-198, se ha señalado que en los primeros días del ciclo (desde el día 27 al 46 después de la siembra) del cultivo, éste ha absorbido el 56-88% del N requerido, con tasas máximas de 1,6 y 5,20 kg ha⁻¹d⁻¹ entre los 45-60 y 41-46 días, respectivamente (Delgado *et al.*, 2004, Rengel, 2004). Durante el llenado de granos (76 y 88 días después de la siembra) el híbrido SK-198 mostró tasa de acumulación diaria de N de 6,82 kg ha⁻¹ d⁻¹ (Rengel, 2004).

El estado nutricional con N en la etapa vegetativa de cinco (V5) y 12 hojas (V12), es un importante regulador del número total de granos y por lo tanto de la producción potencial del cultivo (García y Espinosa, 2009), lo cual destaca la necesidad de establecer mecanismos para el diagnóstico de su disponibilidad en el suelo y de su concentración en la planta.

Generalmente, el estado nutricional de las plantas es evaluado por análisis químico del tejido vegetal (hoja) y, normalmente, en su interpretación son utilizadas concentraciones críticas, rangos de concentración o índices de diagnóstico

(Malavolta, 2006). Sin embargo, estos métodos presentan ciertas limitaciones por el tiempo de ejecución desde la toma de la muestra hasta la obtención de resultados, por el alto costo y la época para la toma de la muestra, en el caso del maíz en floración, lo que no permite corregir alguna deficiencia nutricional en la etapa vegetativa del cultivo.

Métodos de diagnóstico alternativos que evalúan el estado nutricional nitrogenado de la planta, en tiempo real y en el propio campo, como el medidor portátil de clorofila, pueden servir como herramientas auxiliares en la toma de decisión sobre la fertilización nitrogenada (Gil *et al.*, 2002).

El medidor portátil SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development) evalúa, cuantitativamente la intensidad del color verde de la hoja, y calcula un número o índice SPAD, que está altamente correlacionado con el contenido de clorofila de la hoja (Yadava, 1986), por lo que es considerado una alternativa al análisis foliar, en virtud de su rapidez, precisión y bajo costo. Este método se fundamenta en la correlación positiva existente entre el contenido de clorofila en la hoja y el contenido de N en la planta. Ha sido utilizado para diversos cultivos como algodón-herbáceo (Neves *et al.*, 2005), frijol (Carvalho *et al.*, 2003) y café (Godoy *et al.*, 2008), entre otros.

Para maíz se han conseguido correlaciones significativas entre lecturas SPAD, contenido de N y rendimiento del cultivo, en diferentes etapas del mismo, por lo que se ha recomendado como una herramienta apropiada para el monitoreo de la disponibilidad de N en suelo, especialmente en estadios avanzados (Sainz y Echeverría, 1998; Argenta *et al.*, 2004; Rocha *et al.*, 2005).

El uso del clorofilómetro en el manejo de la fertilización nitrogenada de maíz ha sido abordado mediante la determinación de niveles críticos de lecturas de SPAD. La utilización de valores críticos presume que, para cada etapa de desarrollo del cultivo, hay un valor mínimo de lectura SPAD correspondiente al nivel mínimo de clorofila necesario para maximizar el rendimiento de grano (Rambo *et al.*, 2007b). Sin embargo, aunque se ha detectado estrecha relación entre lecturas del SPAD y la producción de grano, se ha encontrado inconsistencia en las relaciones del contenido

de N y dichas lecturas para un mismo cultivo, por lo que la correlación entre estas variables podría no ser tan buena, lo que requiere calibraciones independientes y en diferentes etapas del cultivo (González-Torres *et al.*, 2009).

En Venezuela existen pocos trabajos referidos al uso del clorofilómetro en la evaluación del estado nutricional del cultivo. Cabe destacar los realizados por Sánchez *et al.* (2009), quienes informaron variaciones significativas en el índice SPAD en hojas de maíz, producto de la variabilidad creada por la aplicación de altas dosis de N; y por Escalona *et al.*, (2009), quienes encontraron que el efecto del tipo de fuente de N (Nitrato de calcio con o sin abono orgánico) indujo mayores lecturas SPAD en hojas de lechuga.

Objetivo General

Valorar la utilidad del clorofilómetro en la estimación del contenido foliar de N en el cultivo y como instrumento indicativo de la necesidad de fertilización nitrogenada durante la etapa vegetativa del cultivo.

Hipótesis

La determinación indirecta del contenido de N absorbido por el cultivo, por medio del medidor portátil SPAD-502, proporciona una medida indirecta del estado nutricional de la planta y puede permitir diagnosticar y determinar el requerimiento de este elemento en las etapas iniciales del cultivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Diversos procedimientos de diagnóstico son adoptados en la recomendación de la dosis de N requerida para el cultivo maíz; los que se basan en el balance entre la demanda de N del cultivo y suministro del suelo, en la concentración de N mineral en el suelo y los métodos que evalúan el estado nutricional nitrogenado de la planta. Entre estos, el contenido de N mineral en el suelo está asociado con la capacidad de suministro de N del mismo y el contenido de N en la hoja, con el estado nutricional de la planta y la suplencia de N del suelo (Rambo *et al.*, 2007b).

La concentración del N en la planta entera u hoja puede ser evaluada por métodos directos e indirectos. Los procedimientos directos son aquellos en que la concentración real de N es determinada por procedimientos químicos y normalmente, en su interpretación son utilizadas concentraciones críticas, rangos de concentración o índices de diagnóstico. Este método consiste en la determinación de los contenidos totales de los elementos en periodos específicos del ciclo del cultivo (Malavolta, 2006).

La utilización de este criterio de diagnóstico se basa en dos premisas: *i*) la existencia de una relación directa del contenido foliar y el suministro de nutrientes por el suelo y *ii*) que el aumento o disminución de las concentraciones de este nutriente pueden ser relacionadas con una producción mayor o menor, respectivamente (Bataglia y Dechen, 1986).

Dentro de los métodos indirectos (Sensores espectrales), se citan la determinación de la concentración de clorofila y la intensidad de energía irradiada de la hoja, normalmente asociada al color verde de la misma (Fontes y Araujo, 2007). Los Sensores espectrales son instrumentos con potencial para cuantificar rápidamente el estado nutricional de la planta en tiempo real y en el propio campo. Para tal fin, el empleo de instrumentos que cuantifiquen la intensidad del color verde de las hojas como el medidor portátil de clorofila, permitirán evaluar indirectamente y en forma no destructiva, el contenido de clorofila en hoja y servirían como herramienta auxiliar

en la toma de decisiones sobre la fertilización nitrogenada (Gil *et al.*, 2002; Pietrobón *et al.*, 2012).

1. Medidor indirecto de clorofila

La clorofila es un pigmento que da el color verde de las hojas y se encarga de absorber la luz necesaria para realizar actividad fotosintética; así mismo, la cantidad y calidad de la clorofila se relaciona con el estado nutricional de las plantas (Zotarelli *et al.*, 2003).

La clorofila en los vegetales superiores, bajo las formas *a* y *b*, es constantemente sintetizada y destruida, procesos que son influenciados por factores internos y externos de las plantas. Entre los factores externos, los nutrientes minerales se destacan, porque integran la estructura molecular de las plantas y porque actúan en las reacciones que llevan a la síntesis de esos pigmentos. Por lo tanto, la cantidad del pigmento se ha correlacionado positivamente con el contenido de N en la planta (Silveira *et al.*, 2003; Neves *et al.*, 2005; Levres y Monteiro, 2006).

En la planta de maíz, el contenido de clorofila se encuentra estrecha y positivamente relacionado con la concentración de N en la hoja y refleja la condición nitrogenada del cultivo (Wolfe *et al.*, 1988).

Por consiguiente, la evaluación de la necesidad de N por la planta podría ser determinada por la medición indirecta del contenido de clorofila, debido a que este nutriente es un componente estructural de la molécula de clorofila. En tal sentido, el empleo de instrumentos que cuantifican la intensidad del color verde de las hojas, como el medidor portátil Minolta SPAD-502, permitirá evaluar en forma rápida y no destructiva, el contenido de clorofila en hoja (Pietrobón *et al.*, 2012).

Uno de los medidores portátiles más comunes en el mercado es el SPAD-505 (Soil Plant Analysis Development, Minolta Camera Co. Ltd., Japan). Los valores son calculados por el equipo con base en la cantidad de luz transmitida a través de la hoja, en dos longitudes de ondas (650 y 940 nm), con diferente absorbancia de la clorofila. La longitud de onda de 650 nm está situada entre las dos longitudes de ondas asociadas con la actividad de la clorofila (645 y 663 nm). La longitud de onda de 940

nm actúa como autocorrección, a fin de compensar las diferencias debido al espesor de la hoja. La luz que pasa a través de la hoja alcanza un receptor que convierte la luz transmitida en una señal eléctrica analógica. Las medidas son procesadas y, en la pantalla del clorofilómetro, es mostrado un valor SPAD numérico proporcional a la cantidad de clorofila en la hoja (Argenta *et al.*, 2001; Godoy *et al.*, 2003; Silveira *et al.*, 2003).

El SPAD-502 ha sido evaluado con éxito en frijol (Madeira *et al.*, 2000), maíz (Argenta *et al.*, 2001), algodón (Neves *et al.*, 2005) y lechuga (Escalona *et al.*, 2009), entre otros.

Piekielek *et al.* (1995) observaron que la lectura SPAD aumentó linealmente en la medida que aumentó la producción de grano de maíz. Argenta *et al.* (2001), en evaluaciones del clorofilómetro para predecir la necesidad de fertilización nitrogenada del maíz, reportaron correlación positiva entre las lecturas del clorofilómetro y el contenido de clorofila y N en las hojas en los estadios de 10 a 11 hojas desarrolladas y en floración; sin embargo, en las etapas iniciales de desarrollo del maíz (6 a 7 hojas) este instrumento no fue muy preciso.

Así mismo, las lecturas del clorofilómetro fueron cuantitativamente relacionada, con bastante precisión con la dosis óptima económica de N y la respuesta en rendimiento del maíz, en un amplio rango de condiciones ambientales (Zotarelli *et al.*, 2003; Scharf *et al.*, 2006).

Argenta *et al.* (2001) afirmaron que el instrumento portátil para la determinación de clorofila es ventajoso, una vez que se efectúa en pocos minutos y permite realizar el diagnóstico rápido de la situación del cultivo. Esta metodología presenta como desventaja el ser afectada por numerosos factores tales como genotipo, estado de crecimiento, otros nutrientes, enfermedades y condiciones ambientales como humedad y temperatura al momento de la medición. Por lo que se hace necesario su calibración para cada cultivo y en cada situación (Neves *et al.*, 2005).

Para minimizar la influencia de estos factores, se recomienda la calibración de las lecturas del clorofilómetro estableciendo áreas de referencias con exceso de N para lograr una concentración máxima de clorofila en las hojas. A partir de las

lecturas en la áreas de referencia sin limitaciones de N, se estima un índice de suficiencia de N, el cual se obtiene del cociente entre un índice de verdor (IV) del sector o parcela a caracterizar y el IV del área sin limitaciones de N (García y Daverede, 2006). En este sentido, Zhang *et al.* (2008) evaluaron la sensibilidad del clorofilómetro en la detección de las deficiencias de N en la producción de maíz y afirmaron que en condiciones experimentales es más efectivo que en producción comercial.

2. Uso del Clorofilómetro en el diagnóstico y predicción de la necesidad de fertilización nitrogenada

En búsqueda de mejorar la eficiencia de utilización del fertilizante nitrogenado, es oportuna la adopción de un indicativo del momento apropiado para la aplicación del fertilizante, cuando el N disponible en el suelo no satisfaga la demanda del cultivo.

El principio del diagnóstico foliar consiste en comparar la concentración de los nutrientes en la hoja con un valor estándar proveniente de plantas de alta productividad. Así mismo, la interpretación de los análisis foliares requiere valores de referencia para ser comparados con los resultados analíticos de las muestras. Uno de los criterios más utilizados para la interpretación de los resultados son: el nivel crítico y rango de suficiencia (Bataglia y Dechen, 1986).

El concepto de nivel crítico, corresponde a la concentración mínima del nutriente existente en la planta cuando el crecimiento máximo es alcanzado y por encima del cual hay poca probabilidad de respuesta a la adición del fertilizante (Oliveira *et al.*, 1991).

En el método de rango de suficiencia, como criterio de interpretación, la concentración observada en la muestra de hoja se enmarca en intervalos de concentración como insuficiente, adecuada o excesiva para el cultivo. Este método es menos afectado por pequeñas variaciones locales o factores inherentes a la propia planta que el nivel crítico, además de ser más flexible en el diagnóstico (Bataglia y Dechen, 1986).

El uso del clorofilómetro en el manejo de la fertilización nitrogenada en maíz ha sido abordado de dos formas: con valores críticos del contenido relativo de clorofila y con un índice de suficiencia de N. La utilización del valor crítico presupone que, para cada estadio de desarrollo, hay un valor mínimo del contenido relativo de clorofila que la planta presenta de acuerdo con la lectura del clorofilómetro, correspondiente al nivel mínimo de clorofila necesario para maximizar el rendimiento de granos (Rambo *et al.*, 2007b).

Silva *et al.* (2010) utilizaron el SPAD en la determinación de la dosis óptima económica de N para la producción de tubérculos en batata y estimaron un nivel crítico de índice del estado nutricional de N en la planta. El estudio determinó que las dosis de N tuvieron efecto sobre el índice de SPAD, lo que permitió identificar el nivel crítico del índice SPAD (40,5 - 43,7) para los cultivares evaluados.

Niveles críticos de índice de verdor de 43,1 y 50,2 unidades SPAD, para las etapas de 6-7 y 9-10 hojas desplegadas, respectivamente, en el cultivo de sorgo, permitieron predecir en forma precisa la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada (Ferrari *et al.*, 2012).

La determinación de un nivel crítico de SPAD (35,3), equivalente a un contenido de 1,84% de N en las hojas de maíz, muestra que el SPAD puede ser una herramienta fácil de usar en la detección de niveles críticos de N en hojas de maíz (Novoa y Villagrán, 2002).

González-Torres *et al.* (2009) estimaron un índice de suficiencia de N (ISN), con base en las lecturas del SPAD, calculado por la relación entre la media de las lecturas del equipo con los tratamientos, entre las lecturas en hojas de las plantas que recibieron la mayor dosis, el cual fue relacionado con el rendimiento de maíz forrajero y las dosis de N más el N residual del suelo, que generaron ecuaciones preliminares de ISN. El método utilizado asume que un ISN igual a 1,0 corresponde a la dosis de N para obtener la meta de rendimiento (3.250 kg ha^{-1}). Los autores recomiendan que esta metodología debe ser validada con un mayor número de datos.

El ISN constituye una técnica simple y eficaz para indicar el mejor momento para la aplicación de la fertilización nitrogenada, por cuanto permite diagnosticar el

nivel de N en la hoja y determinar la mejor época para su aplicación, estudios que han demostrado una mejora en la eficiencia de uso del N aplicado por las plantas de frijol y pimentón (Godoy *et al.*, 2003; Barbosa *et al.*, 2008).

Silveira *et al.* (2003) validaron las lecturas del SPAD en cultivares de frijol, 25 a 45 días después emergencia del cultivo, obtuvieron media y baja respuesta a la fertilización de acuerdo a los valores de lecturas realizadas como instrumento indicador de la necesidad de fertilización nitrogenada para el frijol.

En resumen, el clorofilómetro como método de evaluación del contenido de N en las hojas de las plantas es rápido, económico y no destructivo y puede ser usado como instrumento de diagnóstico para auxiliar en el ajuste de las recomendaciones de fertilización nitrogenada en los cultivos, especialmente en maíz, para evitar disminución en la producción. Este método será adoptado por los técnicos, especialistas o productores en la medida que la información generada oriente la toma de decisión sobre la necesidad de la fertilización nitrogenada.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Características del clima y suelo del área experimental

Las principales características de clima y suelo de la localidad Yaritagua, se han indicado en la Figura 1 y el Cuadro 1 del Capítulo II. La precipitación registrada para el año 2010 desde la siembra hasta cosecha fue de 544,7 mm, con temperatura media de 26,8 °C. En general, el suelo es un Alfisol clasificado como Oxic Haplustalfs, de clase textural media (FAa), pH que tiende a la neutralidad en profundidad (6,2 a 7,1) y con baja fertilidad.

2. Evaluación de la respuesta del maíz a la aplicación de dosis de N y su relación con índices de planta y del suelo.

La respuesta del cultivo a la aplicación de dosis crecientes de N y la relación de la misma con niveles de disponibilidad de N en el suelo, se evaluó con la aplicación de dosis crecientes de N (0, 40, 95, 120, 160 y 240 kg ha⁻¹) en el segundo año del estudio (2010), donde previamente se estableció un gradiente de nitrógeno en el suelo, para el primer año, mediante la aplicación de 0, 150, 300 y 450 kg N ha⁻¹. Los tratamientos fueron arreglados en parcelas divididas con tres repeticiones, en bloques al azar, donde las dosis de N establecidas en el primer año del estudio, correspondieron a las parcelas principales y las dosis de N para el segundo año a las subparcelas, las cuales están detalladas en el Capítulo II.

Los procedimientos utilizados para la determinación del N disponible en el suelo y las variables de planta fueron descritos en el Capítulo II.

La estimación de la relación entre los índices de plantas (lecturas del SPAD y de la concentración de N) y del suelo (N disponible), se realizó en el experimento de evaluación de respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de dosis crecientes de N en el suelo, para el segundo año del estudio.

2.1. Determinación de las lecturas del clorofilómetro (SPAD) y la concentración de N foliar.

Se utilizó el clorofilómetro, modelo SPAD-502 (Minolta Camera co. Ltd., Japan). Las lecturas SPAD y el contenido de N foliar se determinaron en los estados fenológicos de cinco a seis hojas (V5-V6), 10 a 11 hojas (V10-V11) completamente expandidas y en floración (R1), después de la emisión de la inflorescencia femenina. En los estados V5-V6 y V10-V11, se tomaron las lecturas en las hojas más recientemente maduras en diez plantas de cada unidad experimental conformada por los cuatro hilos centrales de cada subparcela, de acuerdo a la metodología propuesta por Argenta *et al.* (2001). Durante la floración, en producción de barbas o estigmas, las lecturas se realizaron en la hoja índice VR1 (primera hoja debajo de la mazorca) tal como indicó Casanova (2005). Se realizaron tres lecturas en cada una de las hojas por cada repetición de la siguiente manera: la primera, en un punto central de la sección de muestreo de la lámina de hoja, correspondiente a 2/4 de la longitud de la hoja, y a 2 cm de uno de los márgenes de la hoja y los restantes dos puntos en los extremos del área seleccionada (Figura 15).

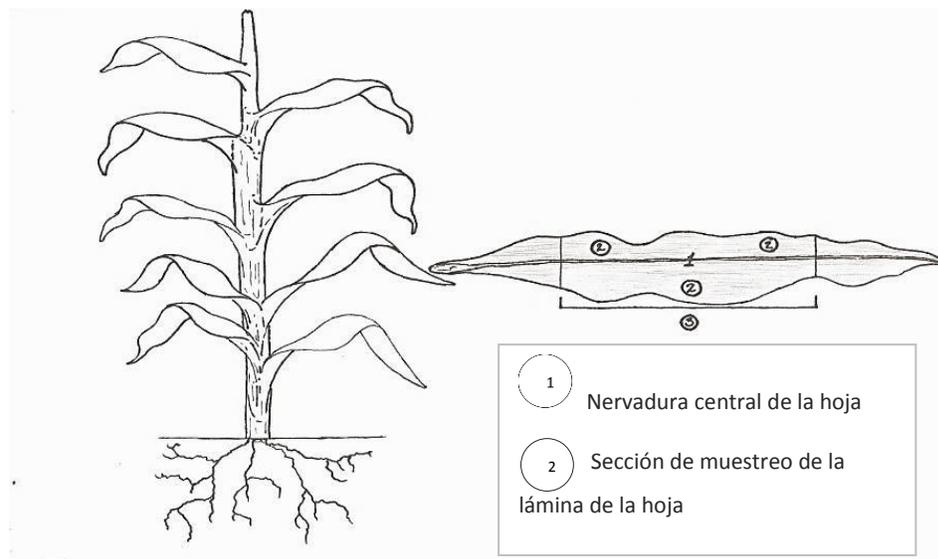


Figura 15. Esquema de muestreo y toma de lecturas SPAD en hojas de maíz

Una vez realizadas las lecturas con el clorofilómetro, las hojas fueron retiradas, conservadas en bolsas plásticas para conformar una muestra compuesta y enviada al laboratorio para su posterior determinación del contenido de N total.

Las muestras foliares de maíz fueron lavadas y almacenadas en bolsas de papel, secadas en estufa de circulación forzada a 60-70 °C por 48 horas y pasadas por un molino con tamiz de 40 mallas. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Análisis de Suelo-Agua-Planta del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP)-INIA, Yzacuy, mediante la técnica de digestión húmeda. Las muestras fueron digeridas con ácido sulfúrico más sulfato de potasio y selenio (1:1), destiladas en micro Kjeldahl y recibidas en solución de ácido bórico con una solución indicadora de azul de metileno, para ser cuantificadas por titulación con ácido clorhídrico 0,05 M (Malavolta, 1997).

2.2. Determinación del contenido de N mineral del suelo

Se tomaron muestras compuestas, formadas por cinco submuestras de suelo en tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-40 cm), en cada una de las parcelas principales al momento de la siembra y previo a la implementación del ensayo de respuesta del cultivo a la aplicación de las dosis crecientes de N (0, 40, 95, 120, 160, 240 kg N ha⁻¹). Un segundo muestreo fue realizado en la fase de cinco a seis hojas del cultivo (V5-V6), previo a la segunda aplicación del fertilizante (2/3 de la dosis), en cada subparcela. Las muestras compuestas formadas por la mezcla de tres submuestras, que a su vez estaban conformadas por cuatro submuestras de suelo a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-40 cm) por subparcela, colectadas en las entrelínea del maíz. El procesamiento y análisis de las muestras para la determinación de las concentraciones de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ están descritos en el Capítulo II.

Las concentraciones obtenidas de N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ y N mineral (N-NH₄⁺ + N-NO₃⁻) en mg kg⁻¹ fueron transformada en cantidad, considerando el peso de una hectárea, de acuerdo a la densidad aparente del suelo de cada profundidad evaluada. Los contenidos de N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ y N mineral para las profundidades 0-20 y 0-40 se estimaron mediante la suma aritmética de las cantidades de cada forma de N evaluadas por cada profundidad de muestreo.

3. Interpretación de las Lecturas del SPAD

Para interpretar el significado de las lecturas del SPAD se utilizó la metodología seguida por Novoa y Villagrán (2002); para lo cual se estableció un nivel crítico, en función del 95% de la producción máxima, aquellos sectores con deficiencia serían los que presenten lecturas menores a éste nivel.

Con base en las ecuaciones generadas de la relación entre las lecturas SPAD y el N disponible (ND) (1/3 dosis más N mineral inicial) para las tres profundidades evaluadas, se estimó un valor máximo de lectura del SPAD y el 95% de este valor fue definido como el valor crítico de SPAD para las etapas V5-V6, V10-V11 y R1 del cultivo.

En analogía al criterio del nivel crítico para la interpretación de las lecturas del SPAD, se establecieron rangos de interpretación de las lecturas SPAD de acuerdo a la respuesta del cultivo a la aplicación de N. Para tal fin se cumplieron las siguientes fases: a) Se definieron las categorías de respuesta del cultivo en alta, media y baja, para las fases fenológicas (V5-V6, V10-V11 y R1), con base en la relación funcional entre el porcentaje de rendimiento máximo (%Rend.máx.) y la dosis del fertilizante nitrogenado aplicado más la cantidad de N mineral evaluado al momento de la siembra y en la etapa V5-V6; una vez deducido el %Rend.máx para cada dosis de N aplicada con respecto al máximo rendimiento obtenido, en porcentaje; b) Se establecieron los rangos de las lecturas SPAD de acuerdo a las categorías de probabilidad de respuesta a la aplicación de N en cada una de las fases fenológicas analizadas, mediante la metodología utilizada por Silveira *et al.* (2003), la cual se fundamenta en que las lecturas SPAD aumentan con el incremento de las dosis de N, es decir, que los valores de las lecturas SPAD incrementan con el aumento de la productividad del cultivo y que presentan tendencia a aumentar con los días después de la siembra; c) Se utilizaron ecuaciones polinómicas entre las lecturas SPAD y el ND (1/3 y total de la dosis más el Nmin) para la fases V5-V6, V10-V11 y R1 del maíz, para establecer los rangos de lecturas SPAD. El ND requerido para alcanzar el máximo % de rendimiento de cada categoría de respuesta fue utilizado para definir los rangos de lecturas SPAD.

4. Estimación de la Dosis de N.

Para estimar la dosis de N se utilizó la relación entre el % Rend. Máx. y el ND (2/3 de la dosis más el Nmin evaluado en la fase V5-V6, previo a la aplicación del reabono). Se determinó el ND máximo para cada profundidad considerada, mediante la primera derivada de la ecuación generada entre la relación del % Rend. Máx. y el ND. Con la determinación del ND requerido para alcanzar el máximo porcentaje de rendimiento y utilizando la Ecuación 2 propuesta ($D = NR - Nmin$) y descrita en el Capítulo II, se estimó la dosis de N de fertilizante a recomendar. Así mismo, se determinó una lectura del SPAD, para separar lotes que responden a la aplicación de fertilizantes nitrogenados, de aquellos que no presentaron deficiencias.

5. Análisis Estadísticos

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza de acuerdo a un arreglo de tratamiento en parcelas dividida, descrito en el Capítulo II.

Los supuestos de normalidad e independencia y la comparación de medias entre los tratamientos por la prueba de Tukey ($\alpha=0,05$) fueron evaluados empleando el SAS (SAS Institute, 1999).

Los datos obtenidos de contenido de nitrógeno total y rendimiento de grano se relacionaron con las lecturas SPAD mediante análisis de correlación y regresión simple y cuadrática, utilizando el Programa SAS (SAS Institute, 1999).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Respuesta del maíz a la aplicación de N y su relación con Lecturas del SPAD y concentración de N en hoja

Los valores de lecturas SPAD obtenidos para las tres etapas evaluadas (Cuadro 4) incrementaron con el desarrollo de la planta, desde 50,21 hasta 54,45 para la etapa vegetativa (V5-V6 y V10-V11) y reproductiva (R1), respectivamente; mientras que la concentración de N en las hojas disminuyó de 3,63 a 2,31% desde la fase de 5 a 6 hojas hasta floración (R1). El análisis de varianza reveló efectos significativos ($P < 0,05$) de las dosis de N, para el primer y segundo año, en el valor de SPAD y contenido de N en las etapas evaluadas. El coeficiente de variación para las lecturas SPAD en las tres fechas evaluadas fue bajo (desde 2,44 hasta 4,0 %), lo que revela elevada precisión en las medidas y permite validar el método utilizado para el cultivo de maíz (Apéndice III-1).

Las dosis de 0 a 40 kg N ha⁻¹ proporcionaron lecturas SPAD más bajas ($P < 0,05$) con respecto a las restantes dosis, lo que evidencia la capacidad del clorofilómetro para predecir en las fases V5-V6, V10-V11 y R1 del maíz deficiencias de nitrógeno (Cuadro 4). En las etapas evaluadas, hubo diferencias ($P < 0,05$) en las lecturas del SPAD debido a las dosis de N y mostraron tendencia a incrementar con el aumento de las dosis de N y durante el ciclo del cultivo. Esta tendencia coincide con lo observado por Hurtado *et al.* (2011), quienes comprobaron el aumento en las lecturas de SPAD durante las fases vegetativa del cultivo, las cuales se estabilizaron durante las fases de pre-floración, V12-V16. Esto fue explicado, en función de que la máxima concentración de clorofila en la hoja es afectada en estas fases de desarrollo del maíz.

Las lecturas de SPAD para la etapa V5-V6 variaron entre 47,34 y 52,49. Estos valores están dentro del rango (29-57) señalado por Piekielek *et al.* (1995), para la misma etapa, en tres años de estudio. Así mismo, Rambo *et al.* (2008) obtuvieron rango entre 40,1 y 52,8 para la etapa V5 con dosis crecientes de N (0 a 300 kg ha⁻¹) aplicadas en forma fraccionada (20% al momento de la siembra y el restante en la

fase V3). Sin embargo, fueron superiores a los obtenidos por Sánchez *et al.* (2009) (42,4 a 45,3) en dosis crecientes de N (0 a 450 kg ha⁻¹).

Cuadro 4. Medias de lecturas SPAD y contenido de N foliar, considerando tres etapas del cultivo de maíz, en función del gradiente de N (1^{er} año) y las dosis de N aplicadas en el 2^{do} año del experimento.

Experimentos	Lecturas SPAD			Concentración de N (%)		
	V5-V6	V10-V11	R1	V5-V6	V10-V11	R1
Gradiente de N kg ha⁻¹	Medias					
0	49,88	51,06	52,09 c	3,48	2,14	2,14 b
150	49,34	53,09	54,64 b	3,74	2,59	2,28 ab
300	50,66	52,62	55,17 ab	3,69	2,53	2,35 a
450	50,96	54,57	55,93 a	3,62	2,66	2,45 a
Dosis de N kg ha⁻¹						
0	47,34 c	48,19 c	50,89 d	3,43 b	2,15 b	2,00 d
40	48,77 c	51,59 b	52,09 d	3,56 ab	2,50 a	2,14 cd
95	50,52 b	53,39 ab	54,27 c	3,57 ab	2,68 a	2,32 cb
120	50,46 b	53,61 ab	55,37 bc	3,78 a	2,66 a	2,32 cb
160	51,70 ab	55,29 a	56,69 ab	3,77 ab	2,77 a	2,43 b
240	52,49 a	54,97 a	57,61 a	3,66 ab	2,56 a	2,62 a

En la fase V10-V11, el SPAD produjo lecturas superiores a las conseguidas por Rambo *et al.* (2007) (52,7, 52,5 y 52,7), de acuerdo al sistema de manejo del N (media, alta y muy alta dosis, respectivamente).

Para la etapa de floración, las dosis de N aplicadas afectaron las lecturas SPAD ($P < 0,05$) y mostraron promedios iguales en función de baja (0-40), media (95-120) y alta (160-240 kg ha⁻¹) dosis de N. El rango de valores de SPAD obtenido para esta etapa del cultivo fueron inferiores a 58,0 determinado por Argenta *et al.* (2001).

Las concentraciones de N foliar, para los estados V5-V6 y V10-V11 fueron de 3,43 a 2,15 % en los tratamientos con 0 kg N ha⁻¹ y desde 3,78 hasta 2,77 en los tratamientos con 120 y 160 kg ha⁻¹, respectivamente. En la etapa R1, la concentración de N aumentó desde 2,0 hasta 2,62% con el incremento de las dosis de N. Valores éstos que están por debajo del nivel adecuado (2,65%) al momento de floración, obtenido por Ramírez (1980) para un rendimiento de 7,1 Mg ha⁻¹ y del rango de

suficiencia (2,78 a 3,5%) propuesto por Solórzano (1997). Sin embargo, el contenido de N foliar obtenido en R1 para todos los tratamientos superó el valor crítico (1,4%), señalado por Casanova (2005).

1.1. Relación entre Lecturas SPAD, Contenido de N en la hoja y Rendimiento del cultivo.

El análisis de regresión evidenció que el rendimiento del maíz presentó relación significativa con las lecturas de SPAD para las fases V5-V6, V10-V11 y R1 del cultivo ($R^2 = 0,56, 0,53$ y $0,54$, respectivamente) (Figura 16). Así mismo, la concentración de N mostró relación con las lecturas SPAD en las etapas evaluadas (Figura 16). El coeficiente de determinación para el estado V5-V6 fue de $0,57$ ($P < 0,05$), inferior a los obtenidos para las etapas V10-V11 y R1 con R^2 de $0,73$ y $0,74$ ($P < 0,05$ y $0,01$), respectivamente, que para estas etapas la mayor parte de la variación del N quedó explicada por el valor de SPAD y por ende por el contenido de clorofila en el tejido. Estos resultados muestran menor asociación que los obtenidos por Novoa y Villagrán (2002) cuando el maíz tenía 5 a 6 hojas ($R^2 = 0,88$).

Por el contrario, los resultados de Argenta *et al.* (2002) revelaron menor correlación entre las lecturas SPAD y concentración de N en los estadios 6 a 7, 10 a 11 hojas y en floración. Sin embargo, las lecturas de SPAD presentaron mayor correlación con el rendimiento del cultivo, respuesta que los autores asocian con el hecho de que las lecturas efectuadas por el clorofilómetro no fueron influenciadas por el consumo de lujo de N bajo la forma de nitrato. Con base en esta asociación, los análisis de N en hoja podrían ser sustituidos por el contenido de clorofila en hoja, medida en forma indirecta por el SPAD.

Por su parte, Rocha *et al.* (2005) obtuvieron alta asociación entre la lectura SPAD y la concentración de N en hoja y el rendimiento para diferentes híbridos de maíz evaluados, en las fases de 4 y 8 hojas completamente expandidas. Estas correlaciones son de importancia porque pueden ser usadas para el diagnóstico en las etapas iniciales del cultivo. Estos autores, afirmaron que la falta de correlación en el estadio de 7-8 y 11-12 hojas completamente expandidas, pudo ser debido al traslado del N por parte de la planta para la producción de fotoasimiladores que están

asociados con el aumento de clorofila, lo que requiere un mayor consumo de N para la síntesis de este pigmento.

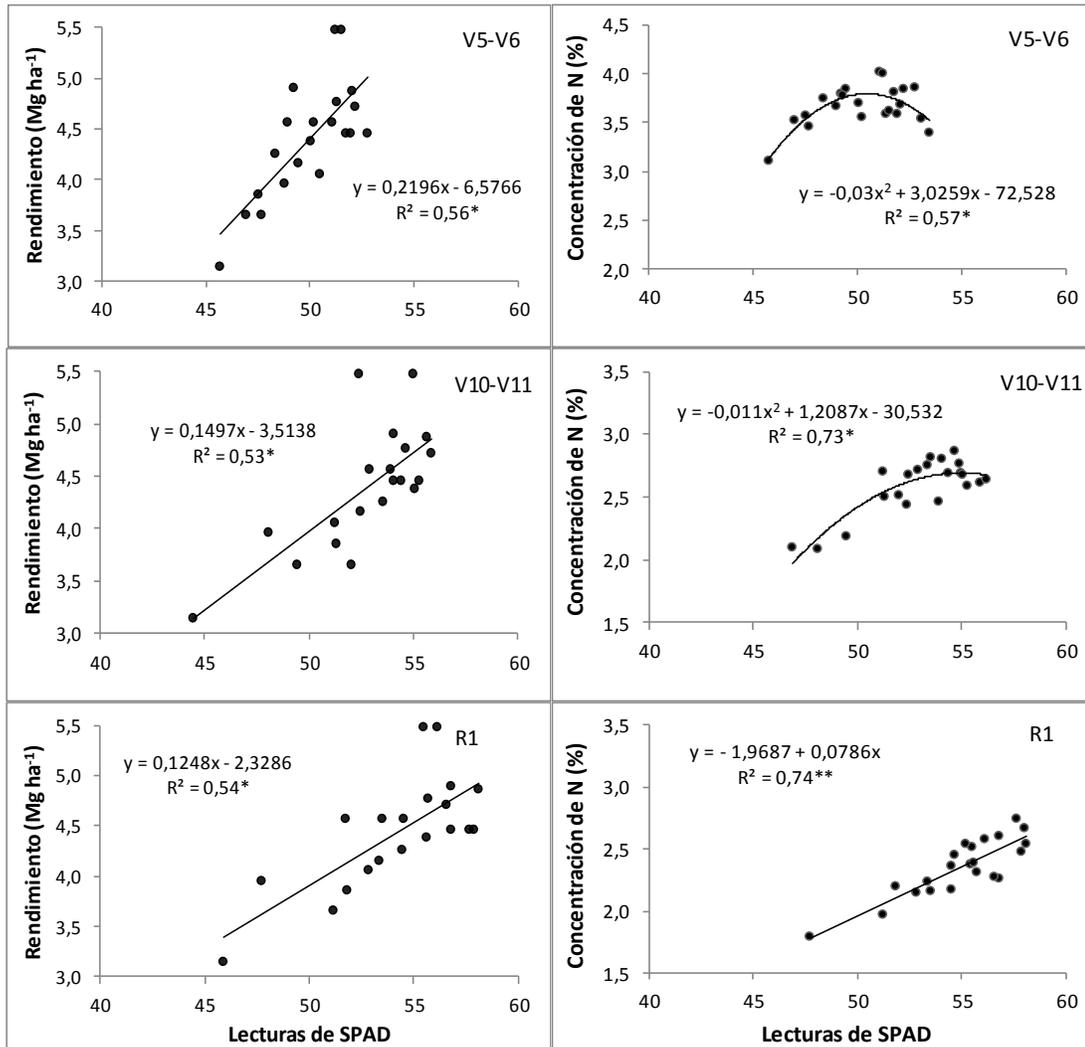


Figura 16. Relación entre las lecturas SPAD, contenido de N foliar y rendimiento del cultivo, en las etapas de desarrollo V5-V6, V10-V11 y floración en el híbrido de maíz DK 357.

Las correlaciones obtenidas en el presente estudio pueden diferir con lo afirmado por Hurtado *et al.* (2011), quienes consiguieron coeficientes de correlación

no significativos para la relación lectura SPAD y contenido de N foliar con el rendimiento del cultivo de maíz para la etapa de floración y afirman que no siempre el equipo permite predecir, con alto grado de confiabilidad, el estado nutricional vinculado al potencial productivo del maíz.

El contenido de N foliar mostró relación ($P < 0,05$) con el rendimiento de grano, para la etapa V5-V6 ($R^2 = 0,40$); mientras que para las etapas V10-11 y R1 la variabilidad de esa respuesta se explicó en menor proporción ($R^2 = 0,33$ y $0,29$, respectivamente, Figura 17). Waskom *et al.* (1996) y Rocha *et al.* (2005) señalaron que no hubo asociación entre el rendimiento y contenido de N en la hoja para las etapas de 6 y 8 hojas totalmente expandidas. Esta falta de asociación está relacionada con los de más factores que afectan el rendimiento (déficit de agua y contenido adecuado de nutrientes, entre otros) y con la mayor absorción de N a inicio del ciclo del cultivo, el cual es posteriormente utilizado para la formación de materia seca y grano (Delgado, 2001).

Por lo tanto, si el contenido de clorofila, medido indirectamente por el clorofilómetro presenta relación con la dosis de N aplicada al suelo y con el rendimiento del cultivo, se evidenciaría la posibilidad de utilizarlo para indicar necesidad de aplicar o no N al cultivo, con el objetivo de mantener contenidos adecuados de este elemento en las hojas. Esta afirmación está en concordancia con lo expuesto por García y Espinosa (2009), quienes indican que el clorofilómetro puede ser una herramienta válida en el diagnóstico del contenido de N en hojas de maíz, para ajustar las aplicaciones en el período de mayor susceptibilidad a la falta de N, de V6 y V12, momento en el que se define el número de hileras por mazorca y en número de granos por hilera, los cuales determinan la formación del número total de granos por mazorca.

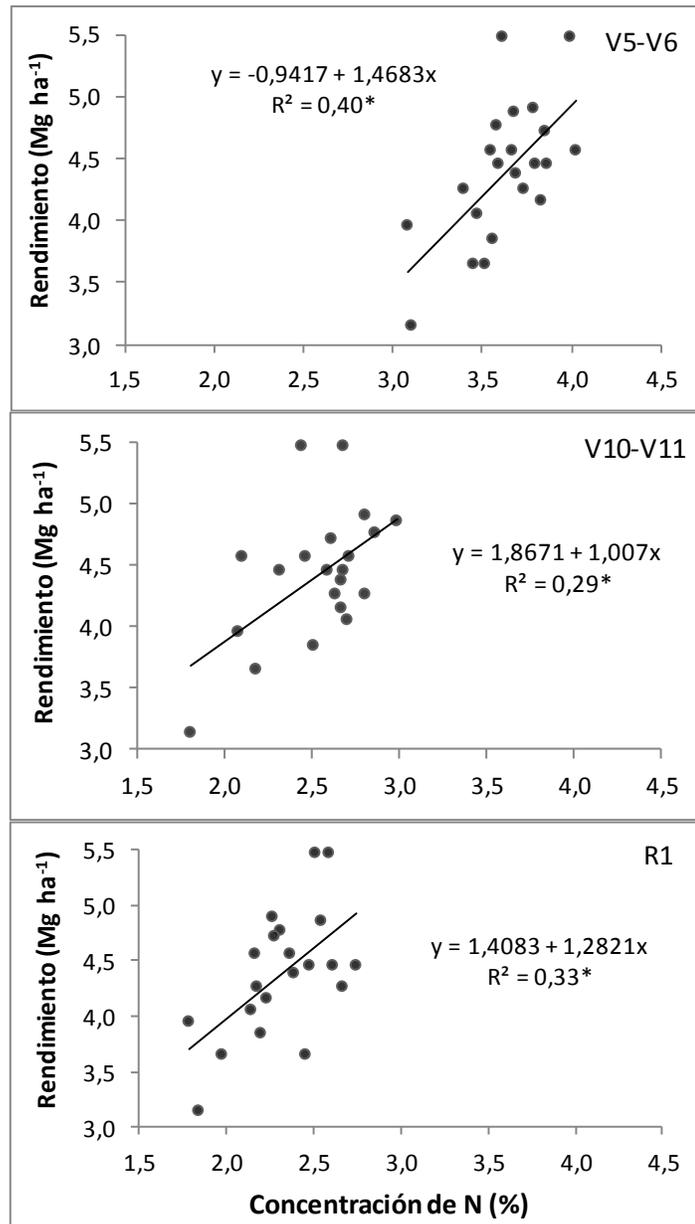


Figura 17. Relación entre rendimiento del cultivo y la concentración de N foliar, en las etapas de desarrollo V5-V6, V10-V11 y floración en el híbrido de maíz DK 357.

2. Relación entre las lecturas de SPAD y N foliar con la dosis de N más el N disponible en el suelo.

Con el fin de integrar características de suelos, como el contenido de nitratos y amonio en el suelo y de plantas (Clorofila y nitrógeno en la hoja) en el diagnóstico nutricional nitrogenado del maíz, fue evaluado el grado de asociación entre estas variables y se utilizó el N mineral (Nmin) ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) del suelo en conjunto con las dosis de N aplicadas con el fertilizante (D), ya que la proporción de N-NO_3^- y N-NH_4^+ fue de aproximadamente 1:1 (Discutido en el Capítulo II). En razón de esto, el Nmin más D fue definido como el N disponible (ND).

En las Figuras 18 y 19 se muestran las relaciones entre las lecturas de SPAD en las etapas V5-V6, V10-V11 y R1 con el ND en los 0-10, 0-20 y 0-40 cm de profundidad. Los incrementos en el ND con 1/3 de la dosis aplicada al momento de la siembra, aumentaron los valores de las lecturas de SPAD para la etapa de V5-V6, con un efecto cuadrático. Así mismo, para la etapa V10-V11, el efecto cuadrático de la fertilización nitrogenada (0 a 240 kg N ha⁻¹) más el Nmin inicial del suelo, aumentó los valores de las lecturas SPAD en 9,0 unidades de SPAD por cada 100 kg de N ha⁻¹.

Para la etapa V5-V6 se obtuvo una disminución del ajuste a medida que la profundidad aumenta, con R² de 0,79 a 0,32 (P<0,05), tendencia contraria muestran los ajustes para V10-V11, los cuales explican desde 81 hasta 93% la relación entre las lecturas SPAD con el ND inicial, para las profundidades 0-10, 0-20 y 0-40 cm, respectivamente (Figura 18).

Las máximas lecturas de SPAD calculadas para la etapa V5-V6 con el N acumulado de 0-10 y 0-20 cm fueron de 52,71 y 53,1. Estos valores de SPAD son semejantes al obtenido (52,1) por Argenta *et al.* (2004) para la etapa V6-V7 y superiores al encontrado (43,4) por Piekielek y Fox (1992), para la misma etapa. Estos resultados demuestran la sensibilidad de esta metodología a factores como genotipo y condiciones ambientales al momento de la medición, lo que hace necesaria su calibración en cada situación.

Los valores obtenidos por el clorofilómetro para la etapa V5-V6, reflejan que las dosis de N utilizadas y el N en el suelo no permitieron alcanzar el valor máximo

de lectura SPAD; probablemente el suelo presentó baja capacidad de suministro de N en la etapa inicial de desarrollo del cultivo.

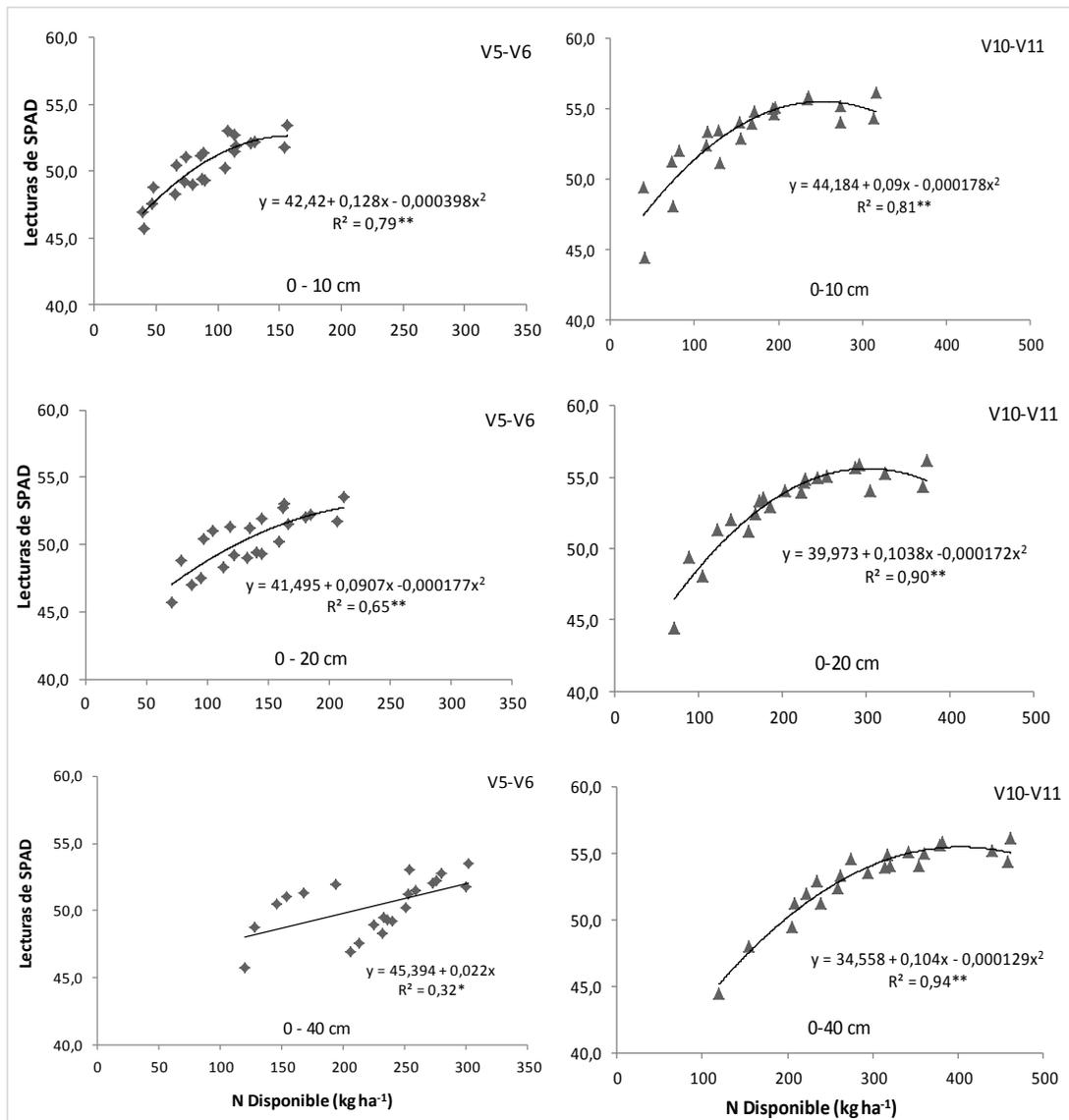


Figura 18. Relación entre lecturas de SPAD en hojas totalmente expandidas de maíz en la fase V5-V6 y V10-V11y el N disponible en suelo acumulado a 0-10, 0-20 y 0-40 cm.

El valor máximo de SPAD para la etapa V10-V11, en función al ND fue 55,5 en promedio para las tres profundidades evaluadas. Este valor fue semejante (55,3) al señalado por Argenta *et al.* (2001) como nivel adecuado de N. Esta etapa se corresponde con un rápido aumento en la absorción del nutriente y acumulación de materia seca y define en gran parte el rendimiento final de grano. Por consiguiente, los valores en las lecturas SPAD, reflejan que la demanda de N por la planta en esta etapa de crecimiento, fue cubierta por la disponibilidad de N en el suelo y las dosis aplicadas. Estos resultados confirman lo informado por Costa *et al.* (2001) y Soratto *et al.* (2004), quienes indican que cuando se trabaja con altas cantidades de N, el contenido de clorofila en la hoja y el índice SPAD tienden a aumentar hasta cierto límite, llamado “punto de madurez fotosintética”, a partir del cual se mantiene invariable, ello indica que no hay producción de clorofila por las plantas más allá de la requerida.

En la etapa de floración (Figura 19), el ND para las profundidades de suelo evaluadas indujo un aumento de las lecturas SPAD, con coeficientes de ajuste de R^2 desde 0,81 hasta 0,93 ($P < 0,05$ y 0,01, respectivamente). Las lecturas SPAD aumentaron con el incremento del ND de 7,5 a 8,3 unidades de SPAD por cada 100 kg de ha^{-1} aplicado. Las lecturas máximas para esta etapa fueron de 57,7 y 58,3 para el ND acumulado desde 0-10 hasta 0-40 cm, respectivamente.

En general, el aumento en las unidades SPAD debido a la fertilización nitrogenada y la disponibilidad de N inicial, permitió expresar la relación entre el N y la intensidad del color verde de la hoja. Además de confirmar la capacidad que tiene el clorofilómetro para detectar la aparición de deficiencia de N antes que sea visible al ojo humano (Samborski *et al.*, 2009).

Con respecto a la concentración de N foliar, las tendencias cuadráticas obtenidas para las etapas V5-6 y V10-11, con respecto al N aplicado como fertilizante más el N mineral en el suelo, presentaron R^2 inferiores e significativas a las obtenidas para las lecturas SPAD (Figuras 20 y 21). Para estas etapas, a pesar que sólo hubo diferencias de los tratamientos con respecto al testigo, se observó un aumento del contenido de N en hoja con las dosis aplicadas y el N mineral del suelo.

Para la etapa de floración, el contenido de N foliar presentó valores de R^2 superiores a los obtenidos para las etapas V5-V6 y V10-V11, y mostró mayor ajuste a 0-20 y 0-40 cm de profundidad ($R^2 = 0,73$ y $0,75$, $P < 0,01$; respectivamente).

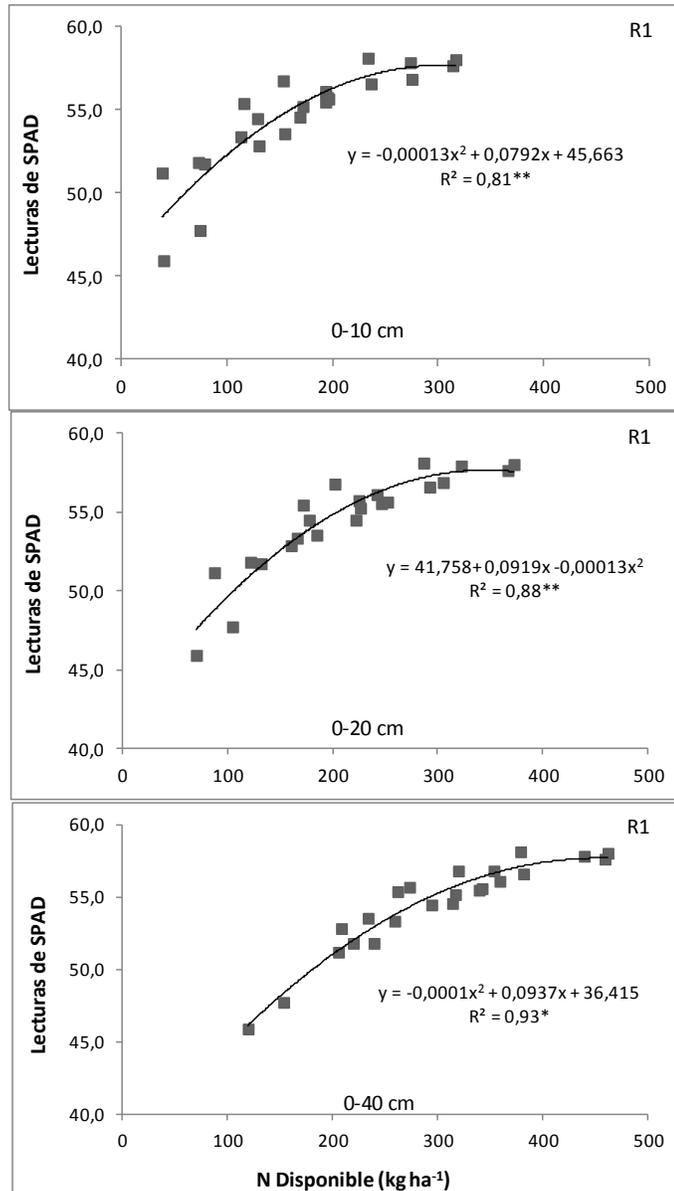


Figura 19. Relación entre lecturas de SPAD en hoja de maíz en la etapa de floración (R1) y el N disponible (Dosis de N más el N mineral inicial) en suelo acumulado a 0-10, 0-20 y 0-40cm.

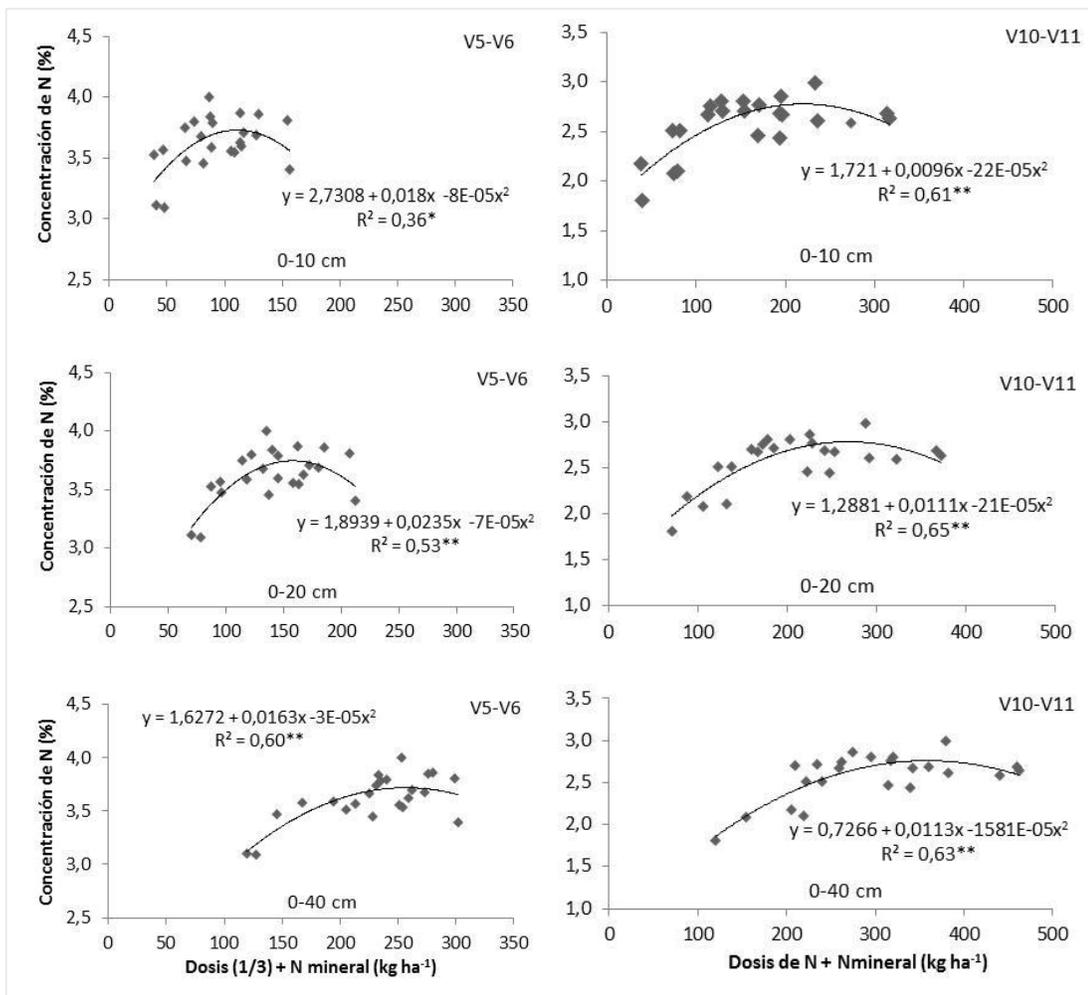


Figura 20. Relación entre Concentración de N en hojas de maíz en la fase V5-V6 y V10-V11 y el N disponible (Dosis de N más el N mineral inicial) en suelo acumulado a 0-10, 0-20 y 0-40 cm.

3. Utilidad del clorofilómetro como instrumento indicativo de la necesidad de fertilización nitrogenada.

Para evaluar la utilidad del clorofilómetro como instrumento de diagnóstico e indicativo de la necesidad de fertilización nitrogenada, se seleccionó la profundidad de 0-20 cm porque generó un ajuste significativo para la etapa V5-V6 y V10-V11; además esta profundidad normalmente es utilizada para el análisis de fertilidad y

recomendada para evaluar los demás nutrientes (P, K, Ca, y Mg) en el suelo para el maíz.

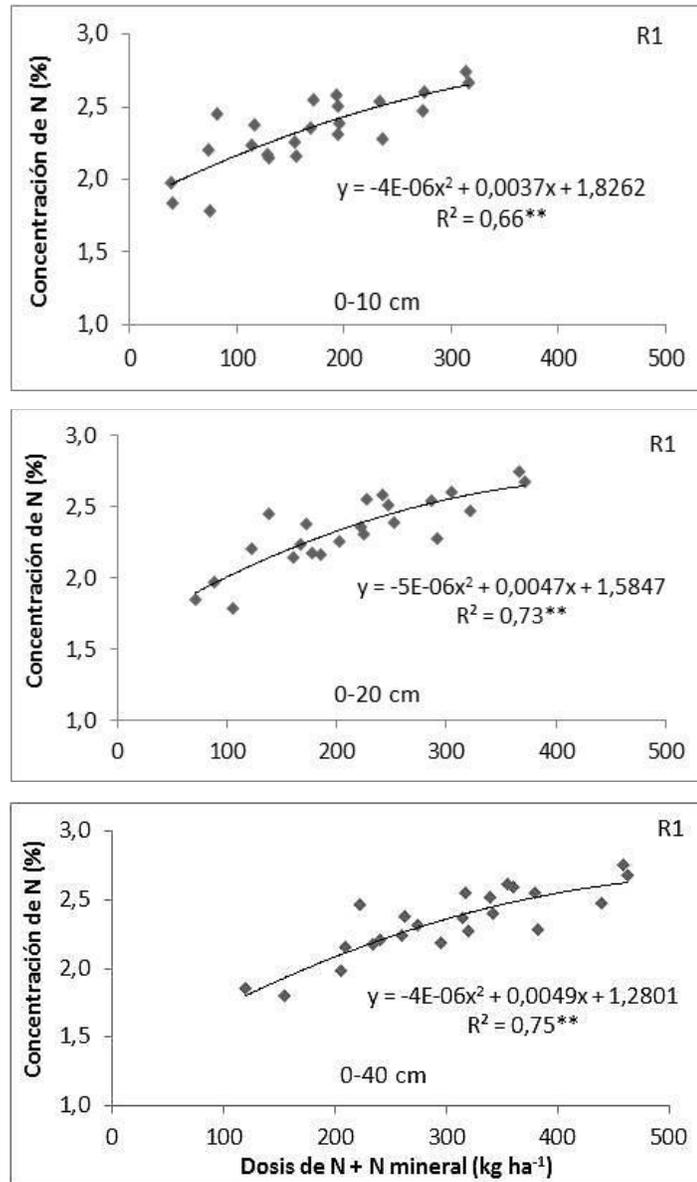


Figura 21. Relación entre concentración de N en hoja de maíz en la etapa de floración (R1) y el N disponible (Dosis de N más el N mineral inicial) a 0-20 cm de profundidad en suelo acumulado a 0-10, 0-20 y 0-40cm.

3.1. Interpretación de las Lecturas de SPAD

Para interpretar las lecturas SPAD, mediante un valor crítico, se utilizó la metodología propuesta por Novoa y Villagrán (2002). Estos autores usaron valores relativos entre sectores que se consideran con niveles de N adecuados y aquellos con deficiencias: (i) Se calcularon los valores máximos de las lecturas SPAD a partir de las ecuaciones polinómicas de la relación de las lecturas SPAD con el ND a 0-20 cm (1/3 de la dosis de N más Nmin inicial), para la etapa V5-V6 y el ND a 0-20 cm con la dosis completa más Nmin inicial, correspondientes a las etapas V10-V11 y R1; (ii) el 95% del valor de lectura SPAD máximo calculado, se estableció como valor crítico para las etapas V5-V6, V10-V11 y R1 (50,4 52,8 y 55,1, respectivamente), es decir que lecturas inferiores a estos valores indicarían la necesidad de aplicar N (Cuadro 5).

Cuadro 5. Lecturas de SPAD máximas y críticas en hojas de acuerdo a la relación entre las lecturas SPAD y el N disponible a 0-20 cm, en las fases de 5-6, 10-11 hojas y en floración del maíz.

Estados Fenológicos	Ecuaciones	R ²	Lecturas SPAD	
			Máxima	Crítica
V5-6	SPAD= 41,495 + 0,0907x -0,000177x ²	0,65 ^{**}	53,1	50,4
V10-11	SPAD= 39,973 + 0,1038x -0,000172x ²	0,90 ^{**}	55,6	52,8
R1	SPAD= 41,758 + 0,0919x -0,00013x ²	0,88 ^{**}	57,9	55,1

**Nivel de significancia al 1%

La concentración de N que corresponde al valor crítico de lectura SPAD para cada etapa evaluada, se estimó con las ecuaciones generadas de la relación entre las concentraciones de N (%) en hojas y las lecturas SPAD para dichas etapas (Figura 16). Los valores de N correspondientes a los niveles críticos de lecturas SPAD, para las etapas de V5-V6, V10-V11 y R1 fueron de 3,77, 2,62 y 2,36 %, respectivamente (Cuadro 6). Concentraciones de N en hojas menores a las señaladas, indicarían la necesidad de aplicar nitrógeno. Estos niveles críticos están por debajo del nivel crítico presentado por Casanova (2005) y del rango de suficiencia (2,70 - 3,50%) por

Solórzano (1997) al momento de floración, y que puede estar relacionado con la naturaleza del material genético.

Zebarth *et al.* (2002) informaron poca consistencia de la relación entre el índice de clorofila en la hoja y concentración de N foliar para la etapa V5, aunque determinaron un valor crítico SPAD de 43,5 para lotes que respondieron a la aplicación de N. Estos autores señalaron que la falta de relación, pudo deberse al uso de diferentes híbridos de maíz y a diferencias en etapas de crecimiento, ambos factores son conocidos por tener una fuerte influencia en el valor de SPAD.

Cuadro 6. Concentraciones críticas de N foliar de acuerdo a la relación entre el contenido de N foliar y lecturas de SPAD críticas en la fase V5-V6, V10-V11 y R1 del maíz.

Estados Fenológicos	Ecuaciones	R ²	N Crítico (%)
V5-6	$N = -72,528 + 3,0259SPAD - 0,03 (SPAD)^2$	0,57*	3,77
V10-11	$N = -30,532 + 1,2087SPAD - 0,011(SPAD)^2$	0,73*	2,62
R1	$N = -1,9687 + 0,0786SPAD$	0,74*	2,36

*Nivel de significancia al 5%

El valor crítico de lecturas SPAD obtenido en el período V5-V6 en la presente investigación, se ubica por encima del rango citado (46,5 - 49,0) por Sainz y Echeverría (1998). Estos autores afirmaron que estos valores pueden estar influenciados por los más altos rendimientos observados.

Precisar un valor crítico de lectura SPAD (52,8), correspondiente a un contenido de N de 2,62% para la etapa V10, permitirá evaluar la posibilidad de aplicar N al cultivo, aunque sin definir la dosis a aplicar. El valor crítico en la interpretación de resultados debe usarse con algunas precauciones, por lo que es necesario tomar en consideración el cultivar, la época de muestreo y aplicación del fertilizante, entre otros aspectos.

Para la etapa de floración, se estimó un valor crítico de SPAD de 55,1 que corresponde con una concentración de N de 2,36 %, valor que sería útil para identificar lotes con deficiencia.

La variación de los valores de lecturas SPAD con las etapas fenológicas, no permite la adopción de un único valor crítico para el cultivo de maíz, por lo que se deberían establecer lecturas SPAD de referencias para cada etapa del cultivo. Para las etapas avanzadas del cultivo (floración), la recomendación de una dosis de N no es de utilidad para corrección de este nutriente, debido a que los componentes del rendimiento ya están definidos.

3.2. Rangos de lecturas SPAD en función a la categorización de la respuesta del cultivo.

Los rangos de lecturas SPAD se establecieron en función a las categorías de probabilidad de respuesta del cultivo a la aplicación de fertilizante y éstas se basaron en la relación cuadrática obtenida entre la producción del cultivo y el ND (Figura 22): la productividad del cultivo aumentó con incrementos del ND hasta un determinado contenido (máximo). Esta misma tendencia la presentaron las lecturas SPAD con el incremento del ND.

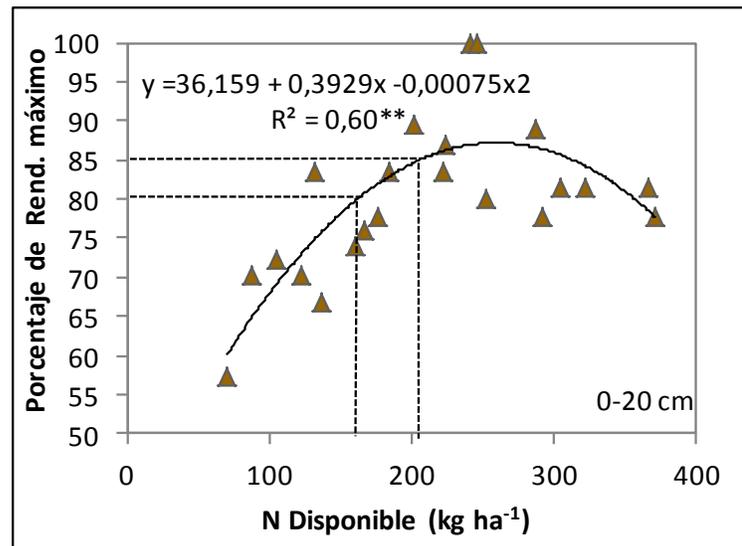


Figura 22. Porcentaje de Rendimiento máximo en maíz en respuesta al N disponible (Dosis de N más el N mineral inicial) del suelo a los 0-20 cm de profundidad.

Por consiguiente, los rangos de lecturas SPAD se establecieron mediante proporción del porcentaje de rendimiento máximo (%Rend.Máx) obtenido, de acuerdo con las categorías de alta, media y baja probabilidad de respuesta del cultivo (Silveira *et al.*, 2003).

Mediante la primera derivada de la ecuación mostrada en la Figura 22 se obtuvo el N disponible a 0-20 cm (ND_{0-20cm}) requerido para alcanzar el máximo porcentaje de rendimiento (87%), a partir del cual fueron definidas las categorías, entre 0 y 80% (Baja), 80-85% (Media) y mayores a 85% del % Rend. Máx (Alta). El ND requerido para alcanzar el máximo porcentaje de rendimiento fue de 262 kg ND ha⁻¹, para obtener el 80% se requiere 161kg N ha⁻¹ y para el 85% del % Rend. Máx 203 kg N ha⁻¹.

El ND_{0-20cm} estimado para alcanzar el %Rend. Máx. de cada categoría de respuesta, se relacionó con las lecturas SPAD mediante las ecuaciones cuadráticas ilustradas en la Figura 18, para las etapas evaluadas. Con base en estas ecuaciones se estimó las lecturas SPAD correspondientes al ND_{0-20cm} requerido para alcanzar el 80, 85 y máximo % rendimiento (87%) esperado. Las lecturas SPAD estimadas conformaron los rangos de acuerdo con el estado fenológico y la probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz (Cuadro 7).

De acuerdo con Silveira *et al.* (2003), la elaboración de estos rangos con los valores de lecturas SPAD de acuerdo a la probabilidad de respuesta, es una información importante para orientar a los productores o técnicos en la toma de decisión sobre el criterio de fertilización.

Cuadro 7. Probabilidad de respuesta del maíz en la etapa V5-V6 a la fertilización nitrogenada en función de las lecturas de SPAD en diferentes etapas fenológicas de cultivo.

Estado Fenológico	Probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada		
	Alta (<80%)	Media (80-85%)	Baja (>85%)
	-----Lecturas de SPAD-----		
V5-V6	< 50,4	≥ 50,5 - 52,8	> 52,8
V10-V11	< 52,2	≥ 52,3 - 55,3	> 55,3
R1	< 53,2	≥ 53,3 - 56,9	> 56,9

Argenta *et al.* (2004) indicaron que valores de lecturas SPAD por encima de 52,1, 55,3 y 58,0, para las etapas de V6-V7, V10 a V11 y en floración, respectivamente, representan un nivel adecuado de N. Por otra parte, Malavolta (2006), afirmó que para llegar a un 100% de rendimiento relativo del maíz es necesario lecturas SPAD alrededor de 53,83 para la etapa de floración.

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que hay buenas posibilidades de detectar deficiencia de N con el auxilio del clorofilómetro en la etapa V5 y V10, cuando hay mayor sensibilidad al estrés por falta de N. Godoy *et al.* (2008) afirmaron que esto sería una ventaja en la utilización del clorofilómetro, debido a que puede auxiliar la toma de decisión en la aplicación del N y verificar si la aplicación fue suficiente, de modo rápido y simple, en el campo.

Se plantea que los rangos de lecturas SPAD establecidos sólo pueden orientar a productores o asistentes técnicos en la toma de decisión sobre la necesidad de aplicar fertilización nitrogenada; sin embargo es necesaria calibración y validación en estudios subsiguientes.

3.3. Estimación de la Dosis de N

La dosis de N que sería necesario aplicar se estimó con base en la relación que mostró el %Rend.máx del maíz con el ND conformado con 2/3 dosis de N aplicada más el N mineral determinado en la etapa V5-V6 ($N_{min_{V5-V6}}$), para las profundidades de 0-10, 0-20 y 0-40 cm (Figura 23). Inicialmente se determinó la dosis óptima de ND, la cual incrementó con el aumento de la profundidad desde 221 hasta 458 kg N ha^{-1} y está significativamente asociada con los contenidos de $N_{min_{V5-V6}}$ en el suelo, previo a la segunda aplicación de 2/3 de la dosis de N. A partir del ND óptimo requerido para alcanzar el máximo porcentaje de rendimiento, y con la determinación del contenido de $N_{min_{V5-V6}}$ en el suelo a la profundidad seleccionada, la dosis de N a aplicar para esta etapa puede ser estimada de la siguiente manera:

$$D \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = ND - N_{min_{V5-V6}} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}$$

De la misma forma, se obtuvo un valor óptimo de lectura de SPAD (51,1) a partir de la primera derivada de la ecuación mostrada en la Figura 24, en la cual el

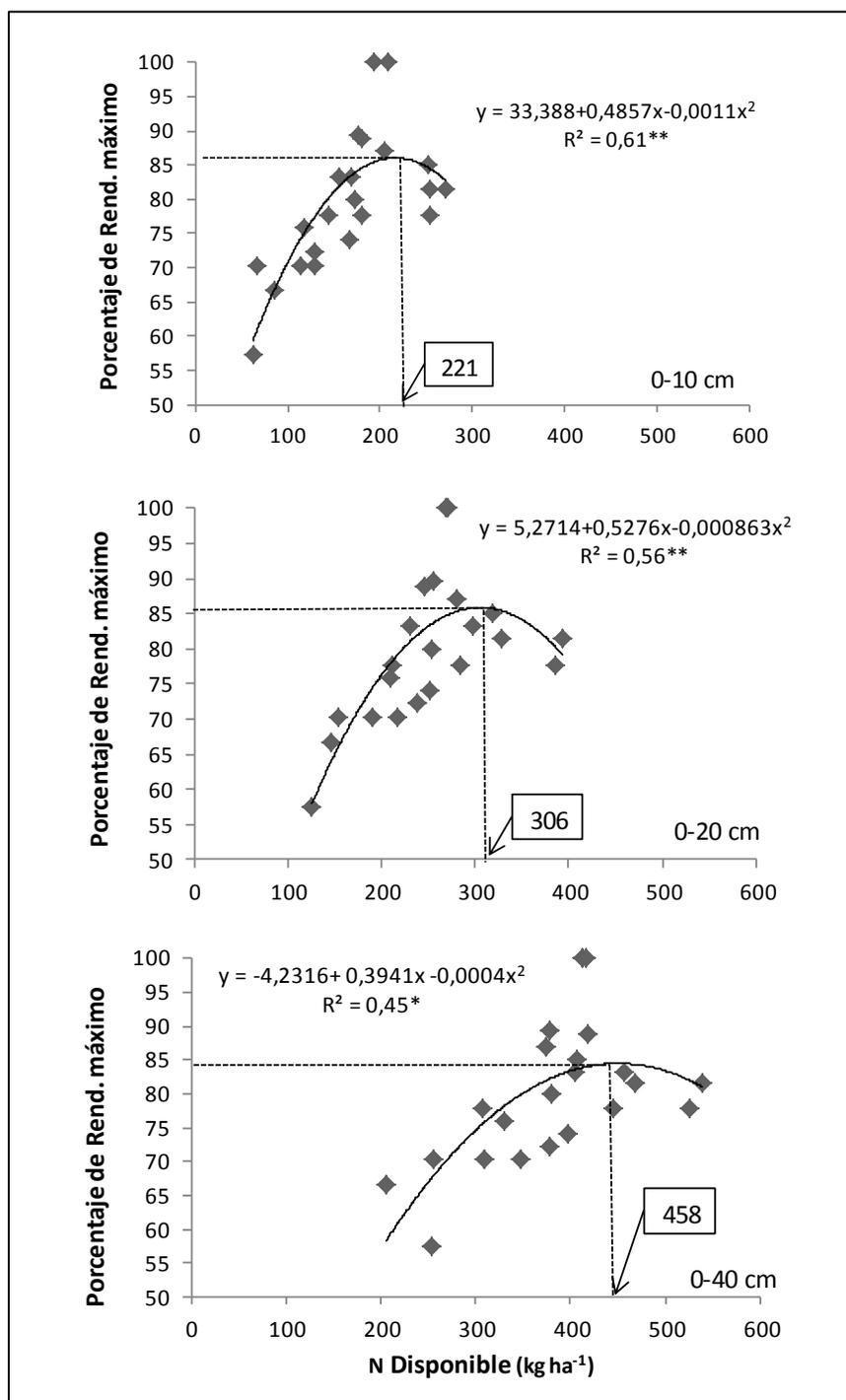


Figura 23. Relación entre el Porcentaje de rendimiento máximo del maíz y el N disponible (Dosis $2/3N + N_{min_{V5-V6}}$) para las profundidades de 0-10, 0-20 y 0-40 cm.

SPAD se evidenció como un buen indicador del porcentaje de rendimiento máximo del maíz ($R^2 = 0,61$), en la fase V5-V6 del maíz.

Rambo *et al.* (2008) obtuvieron dosis de N óptimas de 300 a 200 kg ha⁻¹ para niveles de N aplicado (0 a 300 kg ha⁻¹) en un 100% en la etapa V6. Así mismo, consiguieron valores de SPAD menores de 47,9 para dosis de 0 a 50 kg N ha⁻¹ y mayores de 51,5 para dosis a partir de 100 hasta 300 kg N ha⁻¹.

El valor SPAD obtenido permitirá determinar la probabilidad de que el cultivo responda a la fertilización nitrogenada, por lo tanto se podría adicionar N en la fase V5-V6, cuando la lectura SPAD está por debajo del nivel máximo estimado previamente.

Por consiguiente, el clorofilómetro resulta útil porque es fácil de usar, permite la evaluación en el campo en el momento oportuno, además ayuda en la estimación de la dosis de N. Sin embargo, se han señalado posibles dificultades para traducir los valores de SPAD por debajo del valor crítico, en dosis de N requeridas para esta etapa (Fontes y Araujo, 2007; Zhang *et al.*, 2008).

Por lo anteriormente expuesto, la posibilidad de utilizar un índice que combine características de la planta y del suelo resultaría apropiada como una estrategia para estimar las dosis de N. Esta estimación ha sido elaborada, con base en la concentración de N en la hoja, determinada indirectamente por medio del clorofilómetro; está relacionada con el rendimiento del cultivo y con la cantidad de nitrógeno aplicado y disponible en el suelo, lo que refleja la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada.

De igual forma, será ventajosa y eficiente la utilización en conjunto de estas características en forma de índice para interpretar y estimar la dosis de N a ser recomendada para el cultivo. Para tal fin, se estimó el índice, obtenido a partir de la multiplicación de los valores de lecturas de SPAD en la etapa V5-V6 y el ND (Dosis $2/3 + N_{min_{V5-V6}}$) para las profundidades de 0-10, 0-20 y 0-40 cm. Sin embargo, para utilizar determinada característica de la planta y del suelo como índice, es necesario establecer un valor de referencia o nivel crítico de estas características en función de las dosis de N aplicadas (Fontes y Araujo, 2007).

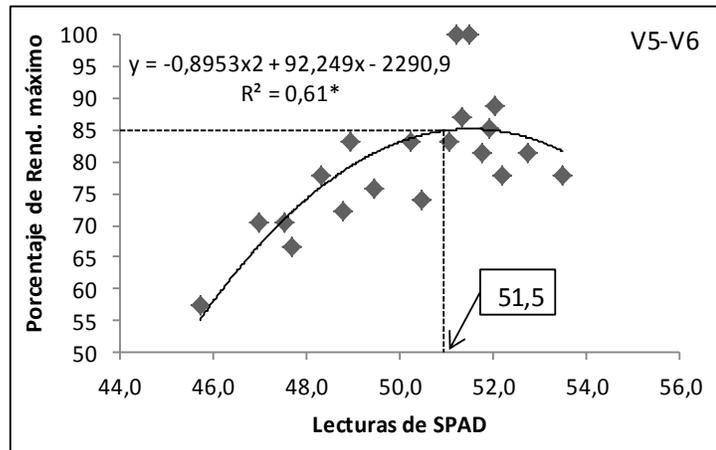


Figura 24. Relación entre Porcentaje de Rendimiento máximo y las lecturas SPAD en la etapa V5-V6 del maíz.

La relación entre los índices y el % Rend. Máx mostró que funciones cuadráticas presentaron ajustes de 0,61, 0,56 y 0,48 a los 0-10, 0-20 y 0-40 cm, respectivamente y disminuyeron con el incremento de la profundidad (Figura 25). Con las ecuaciones ilustradas en la Figura 25, se determinaron los rangos de los índices en función de las categorías de probabilidad de respuesta (Cuadro 8); establecidas previamente (0-80, 80-85 y mayores a 85% del rendimiento máximo).

Con los rangos de los índices establecidos fue propuesta la dosis de N que sería necesario aplicar: *i*) se selecciona el índice límite de cada rango establecido de acuerdo a la probabilidad de respuesta que se desea alcanzar (80 o 85% Rend.máx.) (Cuadro 8), *ii*) con el índice (obtenido en el punto *i*), se despeja la dosis de N, la cual queda definida en función del índice [$Lectura\ de\ SPAD_{V5-V6} * (Dosis_{2/3} + N_{min_{V5-V6}}$)]. Esta puede ser expresada en la siguiente ecuación 1:

$$Dosis = \frac{Índice}{Lectura\ de\ SPAD_{V5-V6}} - N_{min_{V5-V6}} \quad (1)$$

La dosis de nitrógeno a aplicar, puede ser ejemplificada para la profundidad de 0-20 cm el cual es recomendado con fines de diagnóstico de la fertilidad del suelo, cuando se desea alcanzar un 85 % del rendimiento máximo, el índice límite del rango

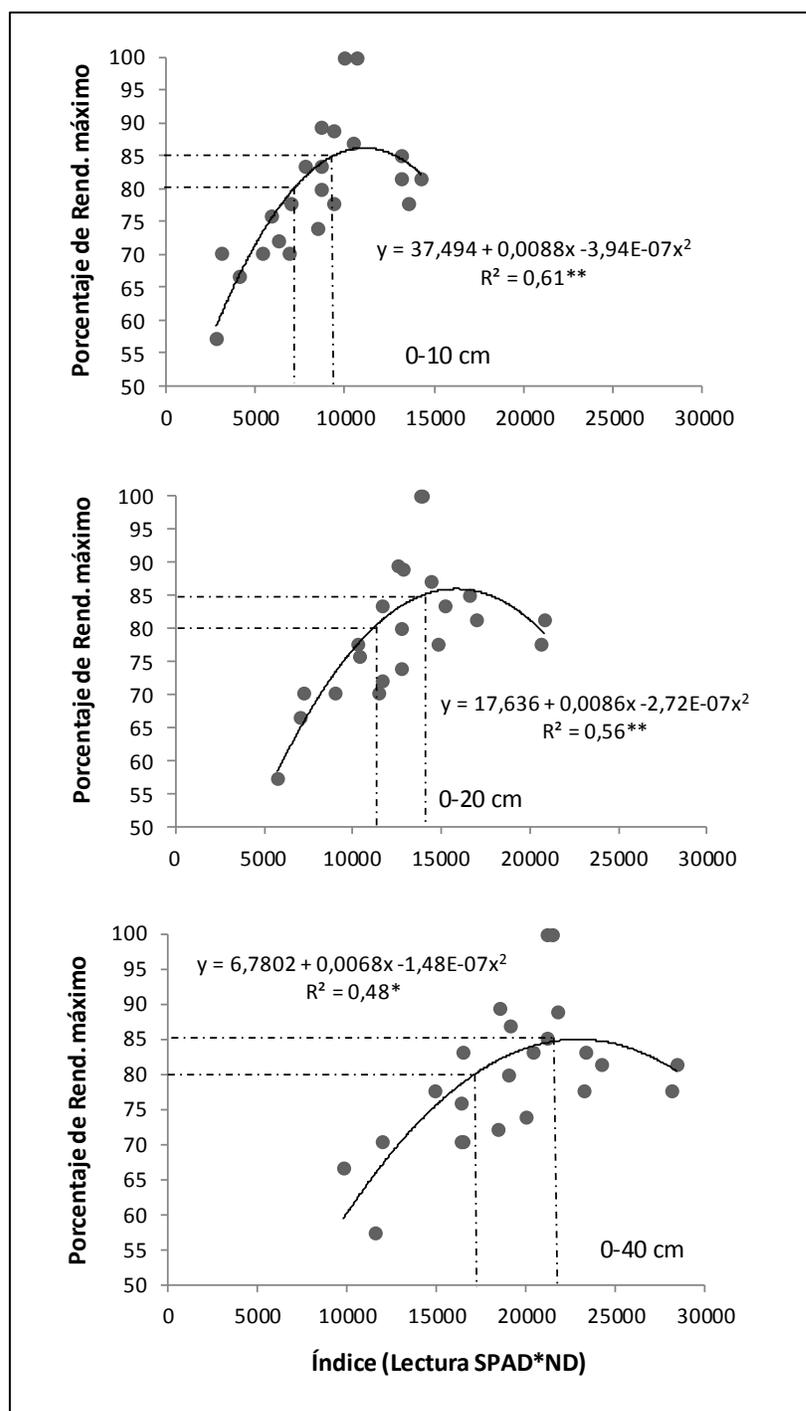


Figura 25. Relación entre porcentaje de rendimiento máximo y el índice de SPAD*ND (Dosis 2/3 + $N_{min_{V5-V6}}$) para las profundidades de 0-10, 0-20 y 0-40 cm.

correspondiente a la categoría media de la respuesta del cultivo, es de 14318 (Cuadro 8). Con el valor del índice obtenido y la ecuación 1, se obtendrá la dosis. Para tal fin, se requiriere la lectura SPAD y el N mineral evaluado en la etapa V5-V6 del maíz. La dosis obtenida para esta etapa debe ser ajustada con la dosis total y el fraccionamiento de la misma (1/3 de la dosis al momento de la siembra).

Cuadro 8. Probabilidad de respuesta del maíz en la etapa V5-V6 a la fertilización nitrogenada en función del índice (Lecturas de SPAD * N disponible) a diferentes profundidades.

Profundidad (cm)	Probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada		
	Alta	Media	Baja
	-----Índice-----		
	5-6 hojas totalmente expandidas (V5-V6)		
0-10	< 7066	≥ 7067 - 9133	> 9133
0-20	< 11267	≥ 11268 - 14318	> 14318
0-40	<17230	≥ 17231 - 22973	> 22973

La probabilidad de utilizar un índice de planta y suelo para estimar la dosis de N no ha sido explorada, es escasa la información en la literatura sobre indicadores útiles y complementarios que permitan la toma de decisiones en cuanto a la cantidad de fertilizantes nitrogenados a utilizar en función al nivel de %Rend.máx que se desea alcanzar.

La metodología propuesta para determinar la dosis óptima de N a ser recomendada en aplicaciones posteriores a la siembra o reabono, a partir de un índice debe ser utilizada y validada para el cultivo de maíz con la determinación de la lectura SPAD y contenido de Nmin en la etapa V5-V6 y debe ser ajustada en función del nivel de rendimiento que se desea alcanzar. Esta propuesta es coincidente con lo afirmado por Rambo *et al.* (2007b), quienes informaron que la estrategia del uso integrado de variables de plantas, como las lecturas SPAD, y la disponibilidad de N en el suelo, debe ser evaluada para predecir la necesidad de N y su aplicación en el reabono.

V. CONCLUSIONES

- Las dosis de N promovieron variaciones significativas en los valores de lecturas SPAD y contenido de N en las hojas en las etapas V5-V6, V10-V11 y R1 del cultivo de maíz.
- Las lecturas SPAD aumentaron de forma cuadrática con las dosis de N aplicadas más el contenido de N disponible en el suelo, en las etapas evaluadas.
- El SPAD-502 puede ser utilizado para detectar en campo deficiencias de N en el cultivo en las fases V5-V6 y V10-V11 de acuerdo con los niveles críticos y rangos de lecturas SPAD establecidas.
- Se determinó un índice para estimar la dosis de N que se recomienda aplicar en la etapa de crecimiento de cinco a seis hojas del maíz, mediante la relación entre las lecturas SPAD y el N disponible en el suelo a 0-10, 0-20 y 0-40 cm de profundidad.

RECOMENDACIONES

- Se requiere calibrar y validar la metodología propuesta para la determinación de la dosis de N a aplicar en lotes comerciales.

APÉNDICE

III-1. Resumen del análisis de varianza para las lecturas de SPAD y contenido de N foliar, considerando tres etapas del cultivo de maíz, en función del gradiente de N (1^{er} año) (A) y las dosis de N aplicadas en el 2^{do} año del experimento (B).

Factor	GL	Lecturas SPAD			Concentración de N (%)		
		V5-6	V10-11	R1	V5-6	V10-11	R1
Cuadrados Medios							
A	3	9,77 ^{ns}	39,81 ^{ns}	49,87*	0,245 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,31*
B	5	42,96**	84,52**	79,63**	0,218*	0,59**	0,56**
AxB	15	2,98 ^{ns}	4,31 ^{ns}	6,93*	0,13 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,09*
Media general		50,21	52,86	54,45	3,63	2,55	2,31
CV (%)		2,44	4,00	2,94	7,60	11,15	6,78
R ²		0,84**	0,79**	0,87**	0,60*	0,64*	0,85**

CAPÍTULO IV

PREDICCIÓN DE LA DOSIS DE N MEDIANTE EL SISTEMA EXPERTO NuMaSS PARA EL MAÍZ EN LA LOCALIDAD DE YARITAGUA, ESTADO YARACUY.

I. INTRODUCCIÓN

De los nutrimentos requeridos por el maíz, el nitrógeno es fundamental por la demanda del cultivo y es el de manejo y recomendación más complejo, en virtud de las múltiples reacciones químicas y biológicas a que está sujeto en el suelo. La fertilización nitrogenada, requiere el establecimiento de estrategias apropiadas que eviten aplicaciones superiores a la demanda del cultivo y aumenten la eficiencia de la fertilización con un mayor aprovechamiento del N.

Normalmente en las estrategias de manejo de la fertilización nitrogenada y en la determinación de la disponibilidad del elemento, se consideran métodos como síntomas visuales, análisis de suelos, análisis de tejido de planta y pruebas biológicas. Cada método presenta sus propias ventajas y deficiencias (Prasad *et al.*, 2002); en consecuencia, es necesario contar con información y conocimiento de los mismos, para diagnosticar deficiencias y con base en ellos emitir recomendaciones a los agricultores. En localidades como Yaritagua y El Rodeo del municipio Peña del valle medio del Río Yaracuy donde se produce maíz, los productores utilizan diferentes dosis y fuentes nitrogenadas. La resultante ha sido sobre o sub-aplicación del fertilizante a nivel de finca.

Para satisfacer estas necesidades, el uso de programas computarizados, puede proporcionar soluciones al problema, específicamente, en el diagnóstico y recomendación de los nutrientes requeridos por un cultivo y suelo determinado, en un sistema agrícola específico.

Por las diversas condiciones de suelos y clima donde se desarrolla el maíz, es necesario evaluar nuevas técnicas, como los Sistemas Expertos o de Apoyo de

Decisiones, que pueden ser útiles para resolver problemas nutricionales, de fertilización, riego, control de plagas y enfermedades, entre otros, en condiciones específicas donde se desarrolla el cultivo (Merino, 1991). Estos sistemas o programas computarizados están basados en el conocimiento humano y permiten resolver conceptualmente problemas de un ámbito específico, de modo semejante como lo haría un especialista en el mismo tema. Se destacan por su capacidad para resolver problemas de aproximación y predicción (Corona *et al.*, 2000; López de Rojas y Silva de Zacarías, 2002).

En Venezuela, López de Rojas y Silva de Zacarías (2002) presentaron por primera vez un Sistema Experto adaptado al campo agrícola del país, para realizar recomendaciones de aplicación y manejo de cal agrícola, en función de los requerimientos del cultivo y suelo determinado. Actualmente, el sistema está distribuido en los Laboratorios del Servicio Nacional de Análisis de Suelos del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP) del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Por otra parte, pocas regiones en el mundo tienen acceso a la información de las variables necesarias para producir decisiones agronómicas, económicas y ambientalmente racionales en el manejo tecnológico de los nutrientes. Esto es particularmente cierto en los países en vías de desarrollo y ello ha sido la base para generar el NuMaSS, como programa de apoyo en la toma de decisiones en el manejo de los nutrimentos del suelo, en forma participativa con la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos de América, en colaboración con algunas Universidades de Estados Unidos y diversos centros de Investigación en Brasil, Ecuador, Honduras y Nicaragua (Osmond *et al.*, 2004).

El NuMaSS ha sido validado en México, Brasil, Costa Rica, Honduras, Nicaragua, Panamá y Perú, es un programa computacional gratuito que diagnostica deficiencias de N, P y acidez del suelo, estima a nivel de finca los requerimientos de fertilizantes de los cultivos y analiza la rentabilidad económica de las dosis recomendadas (Smyth *et al.*, 2007).

En Venezuela, varios trabajos han mostrado información relacionada con el

manejo de la fertilización nitrogenada en maíz, enfocados a determinar el efecto de dosis de N y la respuesta del cultivo a la fertilización con resultados variables de acuerdo a las condiciones agroecológicas donde se realizaron los estudios. Estos resultados contrastan con las recomendaciones utilizadas en el país para el cultivo, las cuales se recomiendan por zonas. Criterio muy impreciso por cuanto basa sus recomendaciones en el promedio de rendimiento, precipitación anual, tipo de suelo representativo de una determinada zona agrícola. En la búsqueda de alternativas a la problemática planteada, se propone el uso del programa NuMaSS para verificar la capacidad de predecir dosis de N para el cultivo de maíz, en localidades del valle medio del Río Yaracuy, que pueda incrementar la precisión en las recomendaciones de fertilización nitrogenada para el cultivo.

Objetivo:

Validar el programa computarizado NuMass en las condiciones edafoclimáticas locales, determinando su utilidad como sistema de recomendación de la fertilización nitrogenada.

Hipótesis

Si el NuMaSS estima las recomendaciones de nitrógeno con base en la disponibilidad del elemento en el suelo, los requerimientos del mismo y la eficiencia de recuperación del fertilizante por el cultivo, se espera que pueda recomendar diferentes dosis de N para las condiciones de suelo donde se presentan contenidos variables de N.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Es necesario un manejo de la fertilización nitrogenada más específico, que puede estar apoyado en sistemas computarizados que utilizan la inteligencia artificial. Esta ciencia tiene por objetivo el diseño y construcción de sistemas capaces de imitar el comportamiento inteligente de las personas (Busto, 2005). Dentro de esta disciplina científica y tecnológica, los sistemas expertos tienen buenas posibilidades con amplio potencial para uso en la decisión de fertilización nitrogenada (Merino, 1991).

Un sistema experto (SE), es definido como un programa informático que utiliza el conocimiento específico, y técnicas de inferencia, para simular la capacidad resolutoria de los expertos humanos en un campo determinado y proporciona soluciones a problemas que son difíciles de resolver. También, puede combinar la experiencia y el conocimiento experimental con las habilidades de un razonamiento intuitivo de una multitud de especialistas para apoyar a los agricultores en la toma de decisión para sus cultivos (Ramos *et al.*, 2006).

Dentro de los Sistemas Expertos desarrollados con el propósito de diagnosticar y predecir dosis de nitrógeno más apropiadas y evaluar el exceso/deficiencia del nutrimento en el suelo, se pueden señalar el sistema FACS (Fertilizer advice and consulting system) descrito por Yost *et al.* (1997), el Sistema Experto Planificación de nutrientes en finca (Robison y Gordon, 1996) y el NuMaSS (Nutrient Management Support System) (Osmond *et al.*, 2004). Estos sistemas utilizan los resultados del análisis del suelo, datos del cultivo anterior, historial agrícola, entre otros y han sido desarrollados para definir los requerimientos de los nutrientes evaluados.

En la actualidad, se ha generado y evaluado la idoneidad de aplicación de diferentes SE en la agricultura con diferentes objetivos, entre los cuales es posible mencionar: El CITRUS, sistema computarizado para diagnosticar el estado nutrimental de naranjos (Corona *et al.*, 2000); el KISAN que diagnóstica la deficiencia/exceso de nutrientes en el suelo y recomienda el fertilizante adecuado

teniendo en cuenta algunas de las propiedades químicas de los suelos (Prasad *et al.*, 2002), el NuDSS para estimar el requerimiento de nitrógeno, fósforo y potasio para el cultivo de arroz bajo riego por sitios específicos en Asia (Witt *et al.*, 2005) y el SE para recomendaciones de aplicaciones de cal en suelos de Venezuela (López de Rojas y Silva de Zacarías, 2002).

Pampolino *et al.* (2012), bajo el enfoque del manejo de nutrientes por sitios específicos en Asia, desarrollaron un SE para nutrientes en híbridos de maíz (NEHM) en Indonesia y Filipinas. En el sistema NEHM, las dosis de nutrientes aplicadas son determinadas con base en el rendimiento alcanzable y la respuesta en rendimiento del cultivo al nutriente limitante a nivel de campo.

El sistema experto de manejo de nutrientes NuMaSS (Nutrient Management Support System), determina a nivel de finca los requerimientos de fertilizantes de los cultivos de sorgo, maíz y algodón (Smyth *et al.*, 2007). Este sistema integra tres subsistemas de Apoyo de Decisión (DSS, por sus siglas en inglés): para nitrógeno (NDSS), para fósforo (PDSS) y para la acidez de los suelos (ADSS). Los cuales están integrados en forma de módulos en un sistema con una interface compartida. Los insumos requeridos varían para cada módulo.

En el NDSS, la cantidad de fertilizante nitrogenado requerido por el cultivo, está basada en la metodología del balance que simula procesos de ganancias, pérdidas y transformaciones del elemento en el sistema, de acuerdo a la ecuación 1,

$$N_{Fert} = (Y_r \times N_{cr}) - [N_{suelo} + (N_{residuo} \times C_r) + (N_{enmienda} \times C_e)]/E_f \quad (1)$$

donde, N_{Fert} es el requerimiento de fertilizante nitrogenado, Y_r es el rendimiento esperado en materia seca total o reproductivo (grano), N_{cr} es la concentración de N (%) en la materia seca total vegetativa o reproductiva (grano), N_{suelo} el N absorbido por el cultivo, proveniente de la mineralización de la materia orgánica del suelo, de los residuos de cosecha del cultivo previo, y de la fijación atmosférica durante la etapa de crecimiento, $N_{residuo}$ es la concentración de N (%) en la biomasa del cultivo anterior (leguminosas de cobertura o residuos de las plantas incorporados al campo), C_r es la proporción de N mineralizada de abonos verdes o residuos que son

absorbidos por la planta, $N_{enmienda}$, es la concentración de N (%) en el estiércol de animales incorporado, C_e es la proporción de N de la enmienda animal que son absorbidos por la planta; E_f es la eficiencia de uso del fertilizante (Osmond *et al.*, 2004).

El programa NuMaSS formula recomendaciones genéricas de fertilización con el uso de los valores prefijados en el sistema o puede generar recomendaciones para condiciones específicas mediante el uso de información local de suelo y planta. Las dosis recomendadas de N y P para maíz emitidas por el programa fueron validadas en 11 sitios de Honduras y Nicaragua, mediante ensayos de respuesta del maíz a siete dosis de N, las cuales fueron menores a las aplicadas por los productores, con ganancia económica superior en la mayoría de los experimentos (Ayarza *et al.*, 2007). Por otra parte, obtuvieron que la dosis a recomendar mediante el uso de datos predeterminados del programa fue mayor, con respecto a la obtenida utilizando los parámetros de planta y suelo del sitio experimental (Trejo *et al.*, 2006).

El NuMaSS fue utilizado para generar recomendaciones de N y P para maíz en diferentes zonas agroecológicas al norte y sureste de Etiopía, donde la agricultura de subsistencia ha causado agotamiento de suelos Vertisoles y Nitisoles de las localidades estudiadas. Estas zonas, presentan limitaciones de nutrientes por alcalinidad y acidez, respectivamente. En el caso de las recomendaciones para maíz en el Nitisol (110 kg N ha⁻¹ y 20 kg P ha⁻¹), presentaron concordancia con las obtenidas a nivel experimental por el NuMaSS (82 a 100 kg N ha⁻¹ y 20 a 27 kg P ha⁻¹). Para la zona con predominio de Vertisoles y con prácticas de manejo como la incorporación de abonos orgánicos, el programa predijo un 55 y 78% de probabilidad de deficiencias de N y P y dosis de 98 a 115 kg N ha⁻¹ y 161 a 213 kg P ha⁻¹. Se propuso usar una cuarta parte, la mitad o el mínimo de la dosis de acuerdo al límite de confianza del fertilizante prescrito, debido a la aplicación de material orgánico por parte de los productores. En estos trabajos se concluyó que el NuMaSS puede ser utilizado como herramienta de diagnóstico de deficiencia de nutrientes y de recomendación de fertilizantes para el maíz al Norte y Sureste del Etiopía (Kebede y Yamoah, 2009; Nigussie y Kassi, 2012).

Salinas-García *et al.* (2008) instalaron para los productores en regiones agrícolas de México el NuMaSS, para facilitar el cálculo y aumentar la precisión de la recomendación de fertilización en los cultivos de sorgo, maíz y algodón. Las recomendaciones fueron validadas en fincas de productores del norte de Tamaulipas y comparadas con recomendaciones para la zona y un testigo sin fertilizar. Las recomendaciones de fertilización por el programa incrementaron el rendimiento de sorgo y algodón en un 26 y 32%, respectivamente con respecto al testigo. En el caso de maíz, las recomendaciones de fertilización por el programa NuMaSS (161-42-00) y la de INIFAP (140-40-00) incrementaron el rendimiento del cultivo en 32% en relación al testigo. Los autores recomiendan evaluar y validar el NuMaSS en diferentes zonas agroecológicas.

Walker *et al.* (2009) presentaron los resultados obtenidos con la aplicación del NuMaSS en explotaciones de maíz de secano al norte de Filipinas desde 1998 hasta 2006. En promedio la recomendación de N para el maíz emitida por el programa fue ligeramente superior a la dosis media aplicada por los agricultores. Los autores concluyen que los agricultores pueden contar con técnicas como el programa NuMaSS para gestionar la producción del cultivo en suelos marginales con problemas de acidez.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Descripción del Sistema Experto de Manejo de Nutrientes (NuMaSS) para las recomendaciones de fertilización nitrogenada

El NuMaSS versión 2.2, integrado por tres subsistemas de Apoyo de Decisiones para el manejo de los nutrientes (N y P) y la acidez del suelo (Smyth *et al.*, 2007), integrados como módulos con una interface compartida, en la que cinco secciones programáticas lo conforman (Figura 1), se describe a continuación:

Geografía: Organiza el mundo por continentes, países dentro de los continentes y agroecosistemas dentro de los países. En esta última se incluyen tres áreas: húmeda tropical, lluviosa o seca y semiárida.

Diagnóstico: Permite al usuario identificar las principales limitantes edáficas del sitio. Para el N casi siempre predice una necesidad de aplicar este nutriente. Consta de cuatro subsecciones: *i*) Cultivo de interés (Rendimiento esperado, % N en el grano, entre otros), *ii*) Cultivo y manejo previo, *iii*) Suelo, utiliza los Órdenes de suelos con la información del pedón, la cual puede ser seleccionada de la base de datos, proveniente del Servicio Nacional de Conservación de Recursos Naturales y Caracterización de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos o del sitio específico y *iv*) Planta, en este caso el sistema utiliza el contenido foliar de los nutrientes del cultivo previo, contando además con imágenes de deficiencias nutricionales y fotos de plantas indicadoras, como información para el diagnóstico.

Predicción: Esta sección pronostica la cantidad de N, P y el requerimiento de cal para obtener el rendimiento esperado. Los resultados de la predicción muestran las dosis de N, P y cal sin ninguna consideración de tipo económico.

Resultados: En esta sección se presentan las conclusiones generadas en las secciones de Diagnóstico y Predicción. El resultado del *Diagnóstico* es la identificación de las principales limitaciones por N o P y acidez, y los cálculos para determinar el requerimiento de fertilizante y enmienda.

1.1. Módulo de Nitrógeno

Para estimar el requerimiento de fertilizante nitrogenado (N_{Fert}), se debe

ingresar información del cultivo, suelo y planta como se indica en el Cuadro 9. A continuación se describe la información solicitada para el diagnóstico, cálculos y transformaciones del N derivado del suelo, el requerido por la planta y la estimación de la necesidad del fertilizante a aplicar (Figura 26).

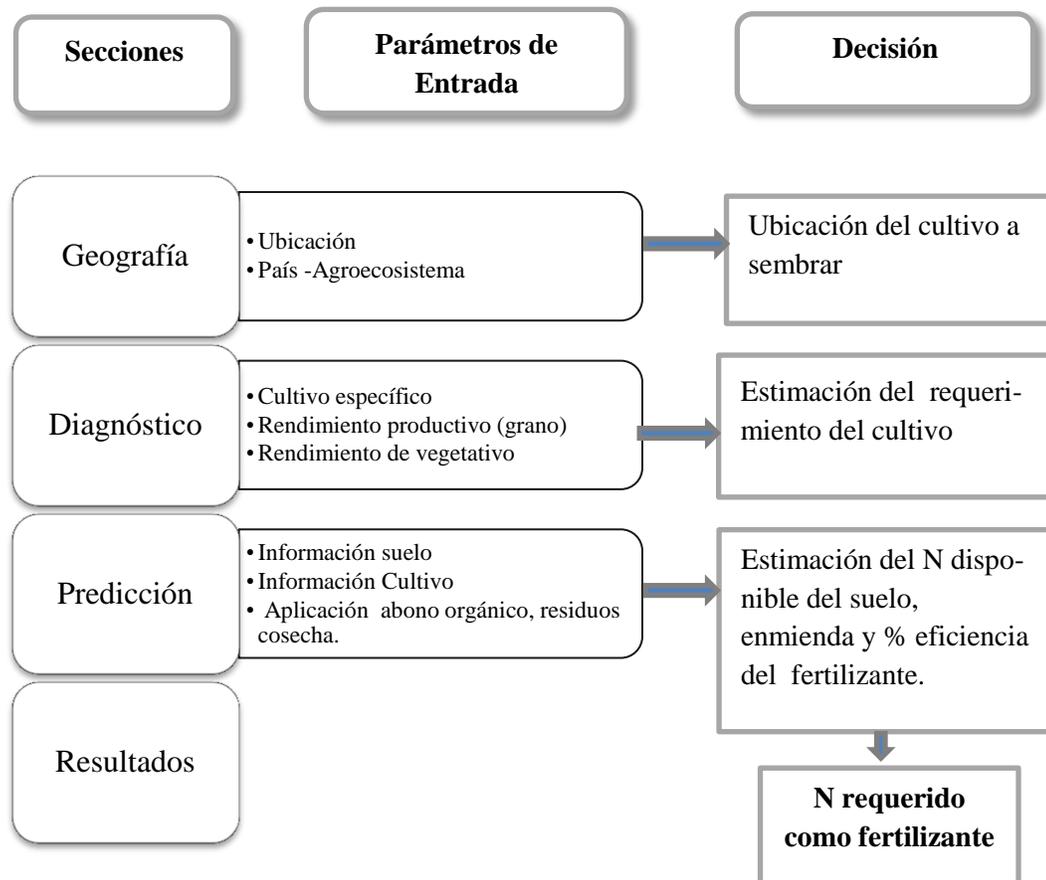


Figura 26. Secciones principales que conforman el Módulo de nitrógeno del programa NuMaSS para maíz.

1.1.1. Diagnóstico: La información requerida está resumida en el Cuadro 9. En esta sección se determina el N requerido por el cultivo y el disponible para el mismo.

1.1.1.1. Determinación del N requerido por el cultivo:

La determinación del requerimiento de N por el cultivo se deriva de la siguiente

ecuación 2:

$$Y_r \times N_{cr} = Y_g \times N_g + Y_s \times N_s \quad (2)$$

donde: Y_r es el rendimiento esperado en materia seca total o grano, N_{cr} es la concentración de N (%) en la materia seca total vegetativa o grano, Y_g es el rendimiento grano real, N_g es la concentración de nitrógeno (%) en grano del cultivo, Y_s corresponde al rendimiento vegetativo y N_s es la concentración de nitrógeno (%) en la porción vegetativa de la planta.

1.1.1.2. Determinación del N disponible para el cultivo:

El módulo para nitrógeno calcula la cantidad de N disponible para el cultivo ($N_{disponible_planta}$), mediante la siguiente ecuación 3:

$$N_{disponible_planta} = N_{suelo} + N_{residuo} + N_{estiércol} \quad (3)$$

donde N_{suelo} es el N proveniente de la mineralización de la materia orgánica, $N_{residuos}$ es el N mineralizado de abonos verdes, residuos, como el rastrojo o compost que se agrega al campo y $N_{estiércol}$ es el N mineralizado a partir del estiércol o abono animal. De no contar con información solicitada, como *aplicación de enmiendas orgánicas* por ejemplo, el programa no lo considera para el cálculo de la necesidad del fertilizante nitrogenado.

Para la determinación de N_{suelo} , el sistema puede utilizar cuatro métodos y selecciona automáticamente uno de ellos con base en los datos suministrados e información seleccionada. La precisión en el cálculo del N_{suelo} disminuye a medida que el programa avanza a través de los métodos. Es decir, el método (1) es más preciso y el método (4) es el menos preciso en el cálculo del N_{suelo} .

Métodos para la determinación del N disponible en el suelo:

(1): El método (1), considera que la cantidad de N utilizado o absorbido por un cultivo sin fertilizar es un indicativo de la capacidad del suelo para suplirlo. Si el cultivo previo y el que se va a sembrar son los mismos y el cultivo previo no se fertilizó, entonces el N_{suelo} puede ser calculado en función del rendimiento y el % de

Cuadro 9. Variables requeridas en el diagnóstico y predicción por el sistema NuMaSS para estimar el requerimiento de N para el maíz.

Diagnóstico		
Tipo de Cultivo	Suelo	Planta
<p>Cultivo Intención</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Variedad/Hibrido ▪ Ciclo del cultivo ▪ Rend. deseado o potencial ▪ Rend. en materia seca del cultivo ▪ % N en grano ▪ % de N en rastrojo <p>Cultivo Anterior</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rend. cultivo previo <p>No se aplicó fertilizante el año anterior:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ % N en Grano del cultivo previo ▪ Rend. Rastrojo del cultivo previo ▪ % N del Rastrojo del cultivo previo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Orden de suelo ▪ Contenido de nutrimentos: ▪ pH (H₂O) ▪ MO, C o N total ▪ % de Arcilla ▪ Densidad aparente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis de tejido de hoja en floración: N, P, K, Ca, Mg y S, Niveles Críticos. ▪ Síntomas visuales de deficiencia de nutrientes: Imágenes para cada elemento ▪ Plantas indicadoras en el área: Imágenes
Predicción		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplicación orgánica: <ul style="list-style-type: none"> - Estiércol Animal, - Material Vegetativo: Cantidad y contenido de N,P y K. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplicación de Cal: <ul style="list-style-type: none"> Tipo de material, profundidad de incorporación de la cal 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplicación de Fertilizantes: N <ul style="list-style-type: none"> - Eficiencia del uso del fertilizante Nitrogenado (%), - N nativo o total del suelo (kg ha⁻¹)

N en grano más la producción de rastrojo y su % de N del cultivo previo, información que se introduce en la sección *Diagnóstico* bajo el título *cultivo anterior*.

(2): Considera el valor de N_{suelo} , este puede ser introducido en la sección que corresponde a *Predicción/Aplicación* de fertilizante.

(3): En este método se parte que se desconoce el valor de N_{suelo} , se puede usar el valor de N predeterminado, el cual es derivado de la base de datos.

(4): Este método determina el N_{suelo} , con base en la mineralización del N o C de la materia orgánica del suelo. Se basa en que el 5% de la MO es N total y se mineraliza a una tasa de 2% anual, proporcional a los meses que de duración del ciclo, en el caso del maíz es de cuatro meses. El contenido de materia orgánica, C (%) o N (%) suministrado por el usuario, es captado en la sección *Diagnóstico*. El programa proporciona valores predeterminados para estas características para muchos suelos, si no se tiene un valor de la localidad. El método es utilizado por el programa cuando el cultivo anterior es fertilizado y los datos de suelos son introducidos.

1.1.2. Predicción

En esta sección se considera la *Aplicación Orgánica* y de *Fertilizante*. La *Aplicación Orgánica* como aporte de N, se considera el compostaje, estiércol animal y material vegetativo o residuos de cosecha. Para los abonos verdes que quedan en el lugar o residuos, la información requerida está relacionada con cantidad de peso seco, % N, %P, y %K y tiempo entre la cosecha e incorporación de los residuos, la cual es introducida en esta sección.

La aplicación de fertilizante, está relacionada con la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado (*Ef*) y el N nativo o N total del suelo, datos requeridos para estimar el N disponible para el cultivo (Cuadro 9).

1.1.3. Determinación de la necesidad del fertilizante nitrogenado a recomendar.

Para determinar el N requerido como fertilizante para el cultivo (*N_{Fert}*), el programa utiliza una modificación de la ecuación propuesta por Stanford y Legg (1968), basada en el equilibrio entre el requerimiento del cultivo (*N_{cultivo}*) y el

nitrógeno disponible para el mismo ($N_{disponible_planta}$) y la eficiencia de utilización del N aplicado como fertilizante (Ef), descrita en la ecuación 4.

$$NFert = N_{cultivo} - N_{disponible_planta}/Ef \quad (4)$$

Al final de la sección *Predicción*, el $N_{cultivo}$ y $N_{disponible_planta}$ han sido determinados.

1.1.4. Resultados

En esta sección, una vez realizado el *Diagnóstico y Predicción*, aparecerán dos sub-secciones: *Resumen*, que consiste en mostrar los *Resultados*, *Valores* y *Cálculos* utilizados en la estimación del N necesario para el cultivo (Figura 26).

2. Determinación del requerimiento de fertilizante nitrogenado por el NuMaSS en la localidad de Yaritagua del valle medio del Río Yaracuy, estado Yaracuy

La evaluación de la capacidad del NuMaSS para determinar dosis de N, se realizó en un suelo Oxic Haplustalfs ubicado en la estación experimental Local del INIA, situada en la localidad de Yaritagua del valle medio del Río Yaracuy, en condiciones diversas de disponibilidad de N mineral en el suelo, producto del establecimiento de un gradiente de N durante el 1^{er} año (0, 150, 300 y 450 kg ha) y donde se evaluó la respuesta del maíz a la aplicación de 0, 40, 95, 120, 160 y 240 kg N ha⁻¹ en forma de urea (2^{do} año), experiencia descrita detalladamente en el Capítulo II.

Las dosis de N evaluadas en el 2^{do} año incluyeron dosis de N según el Manual de recomendaciones de fertilizantes para cultivos, para la localidad en estudio (120 kg ha⁻¹) (INIA, 2005), la dosis de N recomendada por el ente financiador (FONDAS) (160 kg ha⁻¹), una dosis superior a la normalmente recomendada (240 kg N ha⁻¹), dosis por debajo de la normal recomendada (0 y 40 kg N ha⁻¹), y una dosis estimada por el NuMaSS (95 kg N ha⁻¹). Esta última dosis se obtuvo mediante el uso de los parámetros de suelo, cultivo y manejo requeridos por el sistema en la parcela donde inicialmente se habían aplicado 150 kg N ha⁻¹, por ser ésta la condición más próxima a la normal aplicada en el área de estudio.

La dosis de N estimada por NuMaSS se comparó con la dosis de N obtenida del

estudio de respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N ($0 - 240 \text{ kg N ha}^{-1}$) (Dosis observada en campo) en cada una de las parcelas principales (12 unidades experimentales). Mediante la primera derivada de la función cuadrática, se obtuvo la dosis de N observada y requerida para la máxima producción o rendimiento. Sin embargo, debido a que, en algunos casos, se observaron rendimientos atípicos para las dosis evaluadas, no asociados a un aspecto conocido, se eliminaron tratamientos en algunas parcelas. Así mismo, no se consideraron las parcelas donde se aplicaron 150 y 450 kg N ha^{-1} del Bloque III por falta de consistencia en la respuesta a la aplicación.

2.1. Coeficientes del cultivo

La información solicitada para la determinación del N requerido por el cultivo y utilizada para el *Diagnóstico y Predicción* en el sistema NuMaSS se describe a continuación: El rendimiento meta o potencial (Y_g) para la localidad Yaritagua, municipio Peña, se obtuvo a través del representante del Fondo para el Desarrollo Agrario Socialista (FONDAS) para la zona (López, 2012, Comunicación Personal). Para el año agrícola 2010 el rendimiento promedio fue de 3481 kg ha^{-1} , con un rendimiento máximo de 5812 kg ha^{-1} , correspondiendo éste al rendimiento esperado (Cuadro 10). La información relacionada con el rendimiento vegetativo (Y_s), concentración de nitrógeno (%) en grano (N_g) y parte vegetativa del cultivo (N_s), fue obtenida del estudio de respuesta del cultivo a la aplicación de dosis crecientes de N (Cuadro 10).

El rendimiento de grano y la producción vegetativa o biomasa aérea fueron determinados al momento que el cultivo alcanzó la madurez fisiológica. Se cuantificó el peso fresco de 10 plantas por tratamiento, cortadas al ras del suelo y secadas a 70°C por 48 horas. Las plantas seleccionadas fueron divididas en hojas, hojas de mazorcas o brácteas, tallo, tusa y grano, para su análisis y se utilizaron para determinar Y_s , N_g y N_s . El Y_s consistió en la suma de hojas, hojas de la mazorca y tallo.

La determinación de la concentración de N en el material vegetal (granos, hojas, tallo y brácteas) se realizó mediante el método Kjeldahl con el uso de H_2SO_4 y

H₂O₂ (Bremner y Mulvaney, 1982), descrita detalladamente en el Capítulo II.

2.2. Parámetros de suelo

Las características químicas y físicas del suelo fueron evaluadas previamente a la siembra del cultivo para el 2^{do} año del estudio. Las muestras de suelo tomadas en las parcelas principales de los tratamientos establecidos para el 1^{er} año, consistieron en una muestra compuesta de cinco submuestras por parcela, a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-40 cm). Las metodologías analíticas para la determinación de pH, materia orgánica, P, K Ca, Mg, Al, CICE, contenido de arcilla y densidad aparente, están descritas en el Capítulo II. Los datos de las características de suelos se fueron ajustadas a la profundidad de 0-15 cm mediante promedios ponderados (Apéndice 1.1), requeridos por el programa (Cuadro 10).

El rendimiento en grano, la cantidad de biomasa aérea total estimada (tallo, hoja y hoja de mazorca) y su concentración de N (%) para los tratamientos con cero aplicaciones de N en el estudio de respuesta del cultivo a las dosis crecientes del elemento, fue introducido como Y_g , Y_s , N_s y N_g del cultivo sin fertilizar, como cultivo previo, para optar por el método 1 para el cálculo del N_{suelos} y $N_{residuos}$.

2.3. Manejo previo

Se recopiló información respecto al manejo previo de la zona experimental, mediante entrevista a los técnicos e investigadores de la Estación Experimental y a productores de la localidad Yaritagua, sobre el manejo del cultivo, sistema de siembra, incorporación de residuos orgánicos, abonos orgánicos y enmiendas, entre otros. Para el *Diagnóstico y Predicción* se registró toda la información anterior en el programa para generar la recomendación.

3. Validación del NuMaSS

Para comparar las dosis estimadas por NuMaSS con las obtenidas en campo y su capacidad predictiva, se utilizó la línea de regresión con pendiente 1 e intercepto 0 (1:1) para visualizar de manera gráfica la similitud entre las dosis estimadas por el programa y las observadas.

Cuadro 10. Parámetros del suelo y cultivo maíz ingresados al NuMaSS en la localidad de Yaritagua del valle medio del Río Yaracuy.

Parámetros del Cultivo												
Cultivo Intención	Maíz								Híbrido			
Rendimiento Esperado Grano al 15% Humedad (kg ha ⁻¹)									5812			
% N en el Grano									1,41			
Rendimiento vegetativo (kg ha ⁻¹)									6275			
% N en la porción vegetativa									1,04			
Parámetro Suelo	Bloque I				Bloque II				Bloque III			
	0	150	300	450	0	150	300	450	0	150	300	450
	Kg N ha ⁻¹											
pH	6,0	5,9	5,8	5,8	6,1	6,0	5,97	5,8	6,9	6,2	6,07	5,9
MO (%)	1,02	0,88	1,09	1,16	1,13	1,0	1,1	1,26	1,27	1,4	1,46	1,26
P (mg kg ⁻¹)	10,3	4,8	6,6	12,9	13,9	13,3	6,9	10,9	14,8	8,7	11,2	9,2
K (cmol kg ⁻¹)	0,24	0,28	0,35	0,31	0,32	0,3	0,35	0,37	0,29	0,39	0,39	0,37
Ca (cmol kg ⁻¹)	2,75	2,49	2,63	3,8	4,1	3,5	3,46	3,39	9,46	6,14	4,06	3,39
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,48	0,56	0,67	0,69	0,67	0,6	0,65	0,63	0,54	0,36	0,5	0,63
CICE (cmol kg ⁻¹)	3,47	5,87	3,65	4,8	5,05	4,5	4,6	4,39	10,3	6,89	4,95	4,39
% Arcilla	22,7	24	23,3	21,3	23,3	23,3	24,7	22,7	22,6	18	24,7	22,7
Da (Mg m ⁻³)	1,5	1,5	1,50	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7

MO: Materia Orgánica; Da: Densidad aparente; CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva

Además se utilizó la prueba de F desarrollada por Dent y Blackie (1979) descrita por Haefner (1996) como se indica en la ecuación 5,

$$F_{(2, n-2)} = \frac{(n \times a^2 + 2 \times a \times (b-1) \times \sum_{i=1}^n x_i + (b-1)^2 \times \sum_{i=1}^n x_i^2)}{2 \times S^2} \quad (5)$$

donde a es el intercepto estimado (β_0), b es la pendiente estimada (β_1), X_i son las estimaciones individuales del programa, μ es el promedio de las salidas del programa, y n es el número de pares observados y estimados. En la ecuación anterior, S se estima según la ecuación 6, y \hat{Y}_i se estima según la ecuación 7:

$$S^2 = \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2} \quad (6)$$

$$\hat{Y} = \bar{Y} + b (x_i - \bar{x}) \quad (7)$$

El estadístico F sigue la distribución F con 2 y $n-2$ grados de libertad. Si el sistema tiene mérito, se fallará en refutar la hipótesis nula donde la pendiente es 1,0 y el intercepto es 0,0, es decir, pequeños valores de F significa que el programa presenta buena capacidad de predicción.

4. Análisis de Sensibilidad del NuMaSS

Con el propósito de evaluar la sensibilidad del NuMaSS para estimar la dosis de N, a variaciones de algunos parámetros de suelo o cultivo, se realizó un análisis de sensibilidad, el cual consistió en la variación de la condición inicial o nominal de la variable a evaluar (Haefner, 1996), con una amplitud de desviación desde ± 5 hasta $\pm 40\%$. Se mantuvieron las otras variables constantes y se corrió el programa para obtener la dosis de N estimada por el NuMaSS para cada cambio de la condición nominal. La evaluación del impacto de la variación de una variable, en la dosis de N determinada por el NuMaSS se realizó de manera gráfica.

5. Análisis Estadísticos

El desempeño del programa NuMaSS en la estimación de la dosis de N se realizó a través del análisis de regresión y significancia del mismo (SAS Institute Inc., 1999), entre las dosis de N estimadas por el NuMaSS y las dosis de N obtenidas del estudio de respuesta del cultivo a la aplicación del elemento.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Respuesta del maíz a la aplicación de N y estimación de dosis de N máxima

En la Figura 27 se muestra la respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes N en parcelas con diferentes niveles de N mineral inicial. Se indican las ecuaciones de regresión que relacionan las dosis de N con el rendimiento, de las cuales se obtuvo la dosis de N asociada al máximo rendimiento mediante la primera derivada. Las dosis de N más elevadas se observaron en las parcelas donde no se aplicó N en el año anterior, desde 174 hasta 186 kg N ha⁻¹, mientras que las dosis menores (89-107 kg N ha⁻¹) se observaron en las parcelas donde se aplicaron 450 kg N ha⁻¹. En general, se observó una tendencia creciente del rendimiento asociado a un incremento de la dosis de N, sin embargo no en todos los casos la relación fue estadísticamente significativa. Es posible que las variaciones observadas en el contenido del N mineral del suelo, las cuales están relacionadas con la variación espacial de propiedades del suelo, afectaran la respuesta del cultivo a la aplicación de dosis crecientes del N.

2. Predicción de dosis de nitrógeno por NuMaSS y su relación con las dosis obtenidas del estudio de respuesta a dosis crecientes de N.

La información obtenida del área de estudio y requerida por el NuMaSS, permitió optar por datos específicos del sitio y fue captada en las Secciones *Diagnóstico* y *Predicción* del programa.

Para la determinación del nitrógeno requerido como fertilizante (*NFert*) el NuMaSS estima el *N_cultivo*, el *N_disponible_planta* en el suelo y eficiencia de uso del fertilizante (*Ef*), esta última información puede ser introducida directamente por el usuario.

Los valores de parámetros de cultivo utilizados fueron los obtenidos en el estudio de respuesta a la aplicación de dosis creciente de N (2^{do} año) y organizados por las parcelas principales donde se creó el gradiente de N. Para un rendimiento en grano esperado en la zona de 5128 kg ha⁻¹, un rendimiento vegetativo promedio de

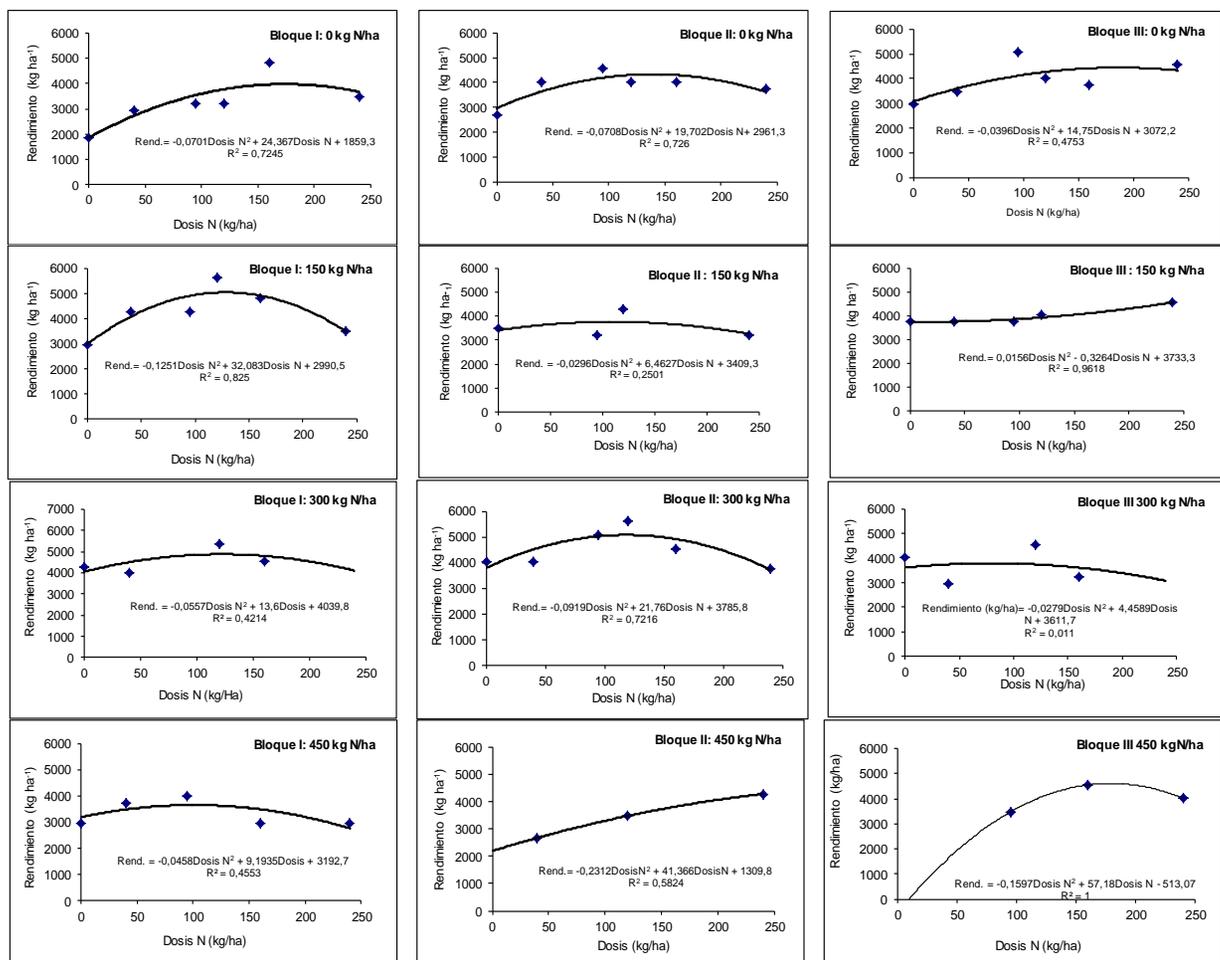


Figura 27. Respuesta del maíz a la aplicación de 0, 40, 95, 120, 160 y 240 kg N ha⁻¹ en las diferentes parcelas donde previamente (1^{er} año del estudio) se aplicaron dosis crecientes del elemento.

6275 kg ha⁻¹ y contenido promedio de N en grano y parte vegetativa de 1,41 y 1,04%, respectivamente (Cuadro 10), el programa predijo un requerimiento de 127 kg N ha⁻¹ (Cuadro 11).

La cantidad de N requerido por el cultivo está dentro del rango (70 a 170 kg N ha⁻¹) de máxima absorción por el maíz sometido a diferentes manejos de fertilización con N en tres sitios evaluados en Venezuela (Delgado *et al.*, 2004) y en concordancia con el rango (0 a 125 kg ha⁻¹) de N requerido por el maíz en sitios evaluados en Nicaragua (Ayarza *et al.*, 2007).

La determinación del $N_{disponible_planta}$ puede ser estimada por varios métodos en el algoritmo del NuMaSS, en función de los datos captados por el mismo. A continuación se discute la determinación del N_{suelo} por los métodos 1 y 4, los cuales se basan en la estimación del N absorbido por el cultivo sin fertilizar y en la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo, respectivamente.

Con respecto a la eficiencia de uso del fertilizante, se utilizó un valor de 24%, el cual representa un valor promedio obtenido de investigaciones realizados a nivel nacional en cultivos de maíz, arroz y sorgo (Cabrera-Bisbal, 2003; Delgado *et al.*, 2004).

2.1. Estimación de la disponibilidad del elemento en el suelo, en función del N absorbido por el cultivo sin fertilizar y dosis generada por el NuMaSS.

En el Cuadro 11 se muestra el N disponible para el cultivo, estimado por el NuMaSS mediante el método 1, el cual se basa en la absorción del N de un cultivo sin fertilizar (N_{suelo}) más el N proveniente del residuo ($N_{residuos}$), considerado el de mayor jerarquía en precisión, que refleja la cantidad de N nativo del suelo que estuvo disponible para el cultivo de acuerdo a la condición inicial en el suelo.

Para la condición inicial donde no se aplicó 0 kg N ha⁻¹ (parcelas principales), el NuMaSS predijo desde 78 a 83 kg ha⁻¹ de N_{suelo} . En las parcelas con aplicaciones previas de 150 kg ha⁻¹, el N_{suelo} fue estimado desde 86 hasta 99 kg ha⁻¹ y mostró tendencia a aumentar en las parcelas con aplicaciones altas (300 y 450 kg ha⁻¹) desde 101 hasta 124 kg ha⁻¹.

La estimación del $N_{residuos}$, en función de la cantidad y porcentaje de N del residuos de cosecha dejados en superficie por 8 meses (período de barbecho) e incorporados con las labores de labranza previas a la siembra, varió desde 10 hasta 19 kg ha⁻¹ y mostró el mayor aporte de N en las parcelas con altas aplicaciones de N previas (Cuadro 11).

El $N_{disponible_planta}$ predicho por el NuMaSS como la suma del N_{suelo} y $N_{rastrajo}$ varió desde 88 hasta 96 kg ha⁻¹ para las parcelas con cero aplicaciones de N en el año previo. Para un escenario normal, con aplicación de 150 kg N ha⁻¹, el ND fue estimado entre 98 y 111 kg ha⁻¹ y aumentó desde 116 hasta 130 kg ha⁻¹ para las aplicaciones altas de N (300 y 450 kg ha⁻¹) (Cuadro 11).

En las parcelas con bajas aplicaciones de N, el programa estimó un $N_{disponible_planta}$ menor y para las condiciones de altas aplicaciones de N en el año previo estimó mayor disponibilidad. Estas diferencias entre los escenarios de N evaluados están relacionadas con el rendimiento y el contenido de N (%) en grano y rastrojo producidos por el cultivo previo, que en el presente estudio se consideró como la producción del cultivo sin fertilizar, correspondiente al tratamiento con cero aplicación de N en la evaluación de la respuesta del cultivo a dosis crecientes de N, y que reflejo la disponibilidad del elemento en condiciones variables del mismo.

El resultado del *Diagnóstico* por el programa arrojó que hay una alta probabilidad (89%) de que el N sea limitante, para todos los escenarios con contenidos variables de N en el suelo (Cuadro 12). Deficiencia que se diagnostica con base en la orden de Suelo y el contenido de N foliar en el cultivo.

La *Predicción* por el NuMaSS del fertilizante nitrogenado necesario (*NFert*) para alcanzar el rendimiento esperado en la zona, indicó dosis desde 0 hasta 161 kg ha⁻¹ (Cuadro 11). Para los escenarios con menor condición de N residual en el suelo (0 y 150 kg N ha⁻¹) las dosis fueron estimadas desde 86 hasta 161 kg N ha⁻¹. Estas dosis disminuyeron desde 0 hasta 45 kg ha⁻¹ para los escenarios con mayor N residual. El programa generó salida numérica acorde al requerimiento de N por el cultivo, a la disponibilidad de N para el cultivo y al requerimiento de N en forma de fertilizante, con base en los parámetros de entrada. En este caso la sección *Cultivo*

Cuadro 11. Predicción del N requerido como fertilizante, en función del requerimiento de N del cultivo y el disponible para la planta, con base al N absorbido por el cultivo sin fertilizar en condiciones variables de N inicial del suelo, según método 1 del NuMaSS.

Variables	Condición variables de N inicial en el suelo											
	Bloque I				Bloque II				Bloque III			
	0	150	300	450	0	150	300	450	0	150	300	450
	Kg ha ⁻¹											
Requerimiento N del cultivo	127											
Rendimiento cultivo previo sin fertilizar (Dosis 0 kg N ha ⁻¹)	3462	3462	5036	3462	3147	3147	4721	3952	3462	4406	4406	3777
Cantidad rastrojo del cultivo previo	4961	5587	6706	4566	6094	6504	5574	5432	4845	5894	6556	6093
% N grano cultivo previo	1,15	1,18	1,13	1,44	1,09	1,45	1,38	1,47	1,22	1,34	1,40	1,39
%N rastrojo del cultivo previo	1,06	0,92	0,81	1,29	0,87	0,72	0,97	1,38	0,86	0,76	0,89	1,12
N-Suelo	83	86	103	101	82	86	109	124	78	99	111	113
N- Residuos (MSTotal)	13	13	14	15	13	12	14	19	10	12	15	17
N disponible para el cultivo	96	99	116	116	95	98	123	143	88	111	126	130
Eficiencia Fertilizante (%)	24											
Fertilizante N Necesario	126	116	44	45	130	122	16	0	161	86	6	0

Anterior del Diagnóstico tuvo su mayor efecto sobre la disponibilidad de N para el cultivo y por tanto en la determinación de la dosis.

Cuadro 12. Resultados del Diagnóstico por el NuMaSS

Resultados de Cálculos de Probabilidades			
Probabilidad que Ocurra un Problema			
Factor	Probabilidad de Deficiencias		
	Fósforo Deficiencia	Nitrógeno Deficiencia	Acidez Problema
Área Agrícola	--	--	--
Cultivo Anterior	--	--	--
Orden de Suelo	0,68	0,74	--
Datos de Suelo	0,56	--	--
Análisis de Tejido	0,42	0,74	--
Deficiencia Nutricional	--	--	--
Probabilidad Acumulativa	0,66	0,89	--

- El rango de Valores de Probabilidad varía entre 0,00 y 1,0.
- Una probabilidad de 0,5 indica una posibilidad similar que haya o no un problema de nitrógeno, fósforo y acidez.
- Una probabilidad de > 0,5 indica una probabilidad de deficiencia de nitrógeno, fósforo y una condición de acidez.
- Una probabilidad de < 0,5 indica una condición en la cual no se dan problemas con nitrógeno, fósforo y acidez.

En la condición inicial donde no se aplicó previamente fertilizante (Parcelas principales con 0 kg N ha⁻¹), el NuMaSS predijo dosis mayores a las recomendadas (100 a 120 kg N ha⁻¹, INIA, 2005) para la localidad, este resultado demuestra poca disponibilidad de N en esta condición (Cuadro 13).

En la evaluación del NuMaSS en 11 sitios de Honduras y Nicaragua, el programa predijo dosis de 116 kg ha⁻¹ utilizando los parámetros de suelo y planta del sitio experimental, producto de las dosis crecientes aplicadas (0 hasta 200 kg N ha⁻¹) (Trejo *et al.*, 2006). La dosis estimada por el programa en este caso está dentro del

rango encontrado para el presente estudio.

Cuadro 13. Resumen de la predicción para Nitrógeno por el NuMaSS

Resultados del Cálculo de Predicción: Bloq II- Trat. 0 kg N ha ⁻¹
Fertilizante Nitrógeno Necesario = 130 kg/ha
Precauciones
No hay precauciones para Predicción de Nitrógeno

2.2. Estimación del N disponible para el cultivo en función del contenido de materia orgánica en el suelo y dosis de N generada por el NuMaSS.

El programa procedió a estimar la disponibilidad de N para el cultivo en función del N mineralizado proveniente del contenido de materia orgánica (Método 4), cuando en la sección *de Diagnóstico y Cultivo Anterior* se seleccionó que el cultivo anterior se le aplicó fertilizante.

El N_{suelo} proveniente del contenido de la materia orgánica del suelo estimado por el NuMaSS varió desde 7 hasta 12 kg ha⁻¹. El $N_{disponible_planta}$ calculado por el programa (N_{suelo} más $N_{residuos}$) arrojó un rango desde 19 hasta 29 kg ha⁻¹ (Cuadro 14). Estos valores de N_{suelo} y $N_{disponible_planta}$ resultaron inferiores a los obtenidos por el método 1 mostrados previamente. Lo antes indicado podría sugerir que la estimación del N_{suelo} por el NuMaSS con base en el contenido de materia orgánica es subestimada.

La dosis de N_{Fert} estimado por este método varió desde 408 hasta 447 kg ha⁻¹, consideradas dosis altas a recomendar para el cultivo de maíz (Apéndice IV- 2). Estas dosis generadas por el NuMaSS son una consecuencia directa de los bajos contenidos de materia orgánica presentes en el suelo del área en estudio, aún cuando no se descarta que la tasa de mineralización (2%) esté siendo subestimada. Estos resultados muestran que éste método para estimar el N_{Fert} puede resultar impreciso, como lo afirman Smyth *et al.* (2007) en la descripción y guía del usuario del programa.

Las dosis de N estimadas por el NuMaSS variaron según la capacidad del suelo

para suplir el N. Esto demuestra que el programa es sensible a este parámetro y podría ser utilizado para la estimación de dosis de N. Al respecto, Salinas-García *et al.* (2008) con información de textura, contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio capturadas por el NuMaSS, obtuvieron recomendaciones para maíz de riego por el programa de 161 kg N ha⁻¹, superior a la emitida por el Instituto de Investigación (INIFAP) para una zona (140 kg N ha⁻¹) agrícola en México. Estos autores concluyen que el programa es una herramienta útil para realizar recomendaciones de fertilización para maíz.

3. Relación entre las dosis de N generadas por el NuMaSS y las obtenidas del estudio de respuesta a dosis crecientes de N.

En la Figura 28 se muestra la relación entre las dosis estimadas por el NuMaSS y las dosis máximas observadas del estudio de respuesta del maíz a la aplicación del elemento. El programa predijo consistentemente las dosis de N a recomendar en un amplio rango de magnitud del elemento en el suelo, en comparación con las obtenidas en campo.

Las dosis máximas de N observadas fueron obtenidas por medio de la primera derivada de la ecuación polinómica ajustada entre el rendimiento y las dosis evaluadas (0 a 240 kg N ha⁻¹), para cada parcela principal donde se evaluó la respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N. Sin embargo, en algunos casos se observaron rendimientos anómalos no asociados a un aspecto conocido o a la dosis de N aplicada, por lo que las parcelas donde se aplicaron 150 y 450 kg N ha⁻¹ del Bloque III, no se consideraron por falta de consistencia en la respuesta a la aplicación del elemento.

Las dosis estimadas con la ejecución del NuMaSS en las 12 parcelas principales donde se evaluó la respuesta del maíz a aplicaciones de dosis crecientes de N, mostraron que el sistema estimó dosis reales que se ubicaron en el rango desde 0 hasta 161 kg N ha⁻¹, mientras que las dosis observadas variaron desde 85 hasta 180 kg N ha⁻¹ (Figura 28). Se observó que aunque existe diferencia entre las dosis estimadas

Cuadro 14. Requerimiento del cultivo, N disponible en suelo y N requerido como fertilizante estimado por el Método 4 del programa NuMaSS, el cual estima el N suelo con base en la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo.

Condición inicial de N en el suelo													
Variable	Bloque I				Bloque II				Bloque III				
	0	150	300	450	0	150	300	450	0	150	300	450	
kg ha ⁻¹													
Requerimiento N del cultivo	127												
Materia Orgánica (%); Prof. 0-15 cm	1,02	0,88	1,09	1,16	1,13	1,03	1,1	1,26	1,27	1,4	1,46	1,26	
N-Suelo	8	7	8	9	9	8	9	10	11	12	12	9	
N- Residuos (MSTotal)	13	13	14	15	13	12	14	19	10	12	15	17	
N disponible para el cultivo	21	19	22	23	22	20	22	29	21	24	27	27	
Eficiencia Fertilizante Nitrogenado	24 %												
N requerido como fertilizante	441	447	437	430	435	445	435	408	440	432	416	418	

y observadas, arrojaron un ajuste lineal con coeficiente de determinación de 0,65 ($P < 0,05$).

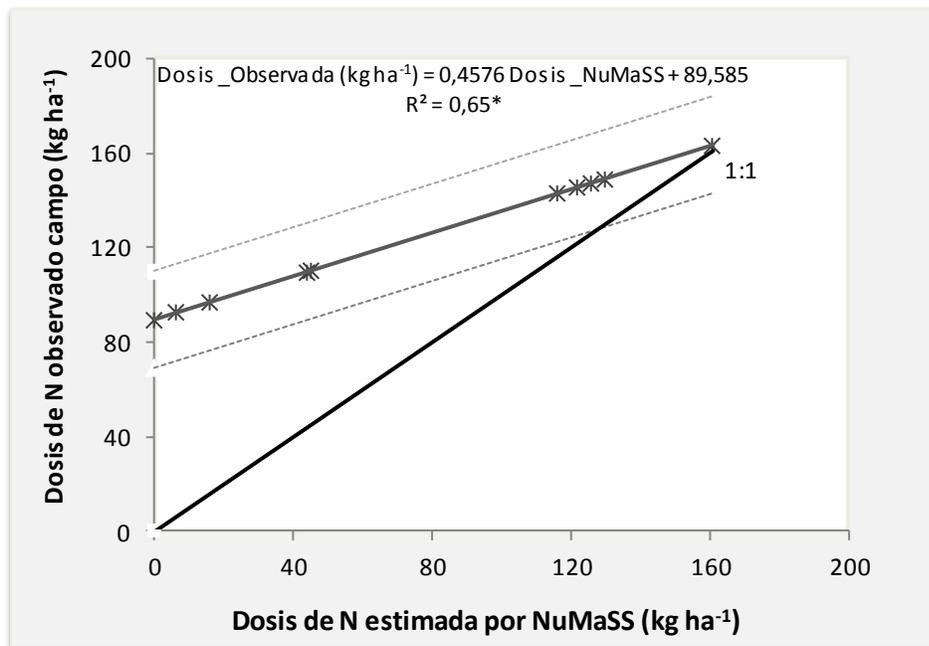


Figura 28. Relación entre la dosis de N predicha por el NuMaSS y dosis observadas obtenida de la respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes del elemento.

Por otra parte, del análisis del modelo de regresión obtenido de la relación de las dosis de N observadas y las estimadas por NuMaSS como se muestra en la Figura 28, se observa que la línea 1:1 casi no cae dentro del intervalo de confianza lo que denota una tendencia del NuMaSS a subestimar dichas dosis con mayor énfasis en el rango de 0 a 50 kg ha⁻¹. Estas dosis generadas por el programa provienen de las parcelas con la mayor cantidad de N residual, producto de las aplicaciones en el primer año del estudio. Más aún, al estimar el estadístico F, su valor fue muy superior a los valores críticos o tabulado, por lo que se rechaza la hipótesis nula de que B0 y B1 son similares 0 y 1 respectivamente. Es decir las dosis estimadas por el NuMaSS se alejan de las observadas en campo.

El promedio general de las dosis estimadas por el NuMaSS (77 kg N ha^{-1}), fue inferior al promedio de la dosis N máxima (123 kg N ha^{-1}) obtenida para cada parcela principal. Sin embargo, una comparación de las dosis de N estimadas por NuMaSS y las observadas en campo, agrupadas por los tratamientos 0 y 150 kg N ha^{-1} y por los tratamientos 300 y 450 kg N ha^{-1} , muestra que en el primer caso los promedios fueron 144 y 124 kg N ha^{-1} para observadas y NuMaSS respectivamente, mientras que para el segundo grupo los promedios fueron 102 y $18,5 \text{ kg N ha}^{-1}$ para las observadas en campo y NuMaSS, respectivamente. Estos resultados indican, que la estimación de la dosis por el NuMaSS se basa principalmente en la cantidad de N absorbido por el cultivo previo sin fertilizar, la cual es utilizada como indicador de la disponibilidad de N, mientras que en la realidad se conoce que otros parámetros de suelo como la disponibilidad de agua y pérdidas de N por lixiviación, entre otros, afectan la disponibilidad del elemento.

Por otra parte, debido a que no en todas las unidades experimentales para el ensayo del 1^{er} año, hubo una tendencia clara entre el rendimiento de grano y la aplicación del elemento, se realizó comparación entre las dosis promedio del NuMaSS y la observada, correspondiente a los tratamientos de N aplicados en el primer año (0 , 150 , 350 y 400 kg N ha^{-1}), y en la que cada uno presentó niveles de N mineral promedio ponderado hasta 40 cm de profundidad de $17,75$; $31,19$; $34,21$ y $34,64 \text{ mg N kg}^{-1}$, respectivamente (Figura 29). De esta manera se observó que las dosis N estimada por NuMaSS y obtenidas de campo decrecen con el incremento del N mineral del suelo y no presentaron diferencias significativas ($P > 0,05$) para las parcelas principales con 0 , 150 , y 450 kg N ha^{-1} . Sólo fue estadísticamente diferente para el grupo de 300 kg N ha^{-1} , en el cual la dosis estimada por NuMaSS fue inferior ($P < 0,05$) a la observada.

Lo antes indicado concuerda con lo señalado por Dobermann *et al.* (2003) quien sugiere que en el NuMaSS, la cantidad de nutriente absorbido está directamente relacionado con su rendimiento, de modo que el rendimiento alcanzable indica la exigencia total de nutrientes y el rendimiento del cultivo sin fertilizar indica el suministro del nutriente nativo del suelo.

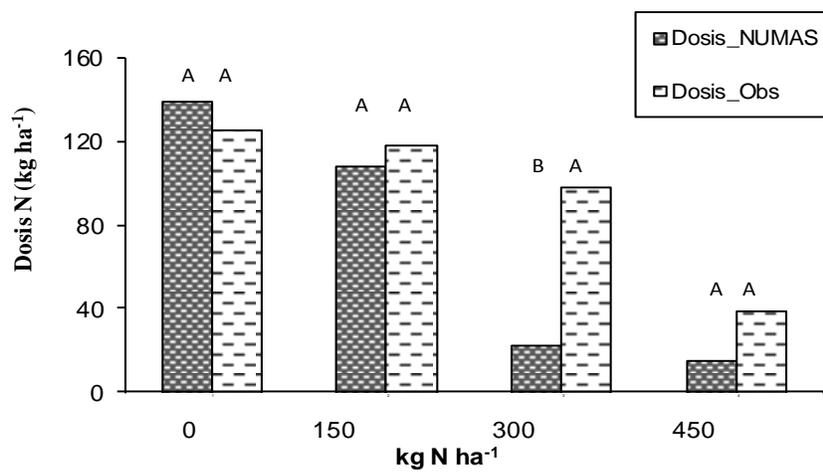


Figura 29. Dosis de N simuladas por Sistema Experto NuMaSS y dosis de N observadas.

Es importante destacar que del análisis de respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes en el 2^{do} año, la dosis de N de 95 kg ha⁻¹ generada por el NuMaSS con los parámetros del cultivo obtenidos en el escenario con 150 kg N ha⁻¹ (1^{er} año), no causó diferencias ($P < 0,05$) en rendimiento de grano del maíz con respecto a la dosis de 120 kg ha⁻¹ (Según el Instructivo de fertilización para maíz en la estación Experimental Yaritagua, INIA), 160 kg ha⁻¹ (Recomendada por el ente financiador; FONDAS-Yaracuy) y la dosis de 240 kg ha⁻¹, pero generó diferencias con respecto al testigo con 0 kg N ha⁻¹. Este resultado muestra que el NuMaSS estimó dosis menores bajo estas condiciones, además no difiere del promedio de las dosis (108 kg ha⁻¹) obtenidas por el programa para las mismas parcelas en el 2^{do} año del estudio.

Resultados encontrados en el presente estudio fueron concordantes con los obtenidos por Corton *et al.* (2003), quienes informaron que las recomendaciones por el NuMaSS resultaron en similar rendimiento del maíz con respecto a las recomendaciones regionales. Estos autores concluyeron que el NuMaSS no predice rendimiento, pero propicia recomendaciones para lograr el rendimiento meta o

esperado, por lo que es importante definir apropiadamente los rendimientos meta para luego estimar las recomendaciones.

Con el NuMaSS es posible estimar la dosis de N para el cultivo de maíz en esta localidad, en concordancia con los resultados obtenidos, sólo en condiciones donde el cultivo previo no se fertilice.

4. Análisis de Sensibilidad

En la Figura 30 se presentan los resultados de la sensibilidad relativa de la dosis de N estimada con respecto a la variación de algunos de los parámetros de entrada del programa. Los parámetros del cultivo como el rendimiento vegetativo (materia seca) al final del ciclo del cultivo (CC) y su contenido de N son importantes. La producción de materia seca (residuos) al final del CC en la condición sin fertilizar refleja la disponibilidad del N en el suelo y los cambios en las condiciones ambientales o edafoclimáticas.

El contenido de N en el residuo, también es afectado por la disponibilidad de este nutriente en el suelo en las primeras etapas del ciclo del cultivo. Especialmente en un cultivo como el maíz, en el cual el patrón de acumulación de materia seca está influenciado por el N absorbido, requerido para la síntesis de materia seca, lo cual sugiere que el N absorbido al inicio es utilizado durante el ciclo para la formación de materia seca (Delgado, 2002b). La demanda de N por el cultivo está determinada por la producción de biomasa y la concentración del nutrimento en la planta.

De igual manera, el %N en el grano como variable de entrada para estimar la cantidad de N requerido como fertilizante, se soporta en la relación de la cantidad de N acumulado en el grano y la absorción de N en las primeras etapas del cultivo (Delgado, 2002b).

En la Figura 30 se aprecia la dosis de N cuando se considera los porcentajes de incrementos o disminución en los parámetros de rendimiento de rastrojo, porcentaje de N en rastrojo y grano. Una disminución en 20% en cada uno de estos parámetros, indica una variación en la dosis de N con respecto a la nominal o dosis obtenida por el NuMaSS para la condición inicial de 150 kg N ha^{-1} (Cuadro 11) de 53, 52 y 29 kg

ha⁻¹, respectivamente. La Menor cantidad de materia seca (rastrajo) producida y N absorbido por el cultivo sin fertilizar, se refleja en menor capacidad del suelo para suplir el N nativo, lo cual causa el incremento del requerimiento de N como fertilizante estimado por el NuMaSS.

Tendencia contraria se observó al aumentar en 10% la producción de rastrojo por el cultivo anterior, el porcentaje de N en el mismo y en grano, que implicó una disminución de la dosis de N a recomendar, cuya diferencia porcentual de la dosis nominal fue desde 77% hasta 74% (Figura 30) Lo que indicaría que los parámetros cantidad de rastrojo y % de N absorbido por el maíz al final del CC son de importancia en el NuMaSS y deben ser determinados con precisión.

Al evaluar la sensibilidad de la dosis de N requerida como fertilizante predicha por el NuMaSS con respecto al parámetro eficiencia de uso del fertilizante (*Ef*), (Figura 31), se observó que un aumento del % de *Ef* se refleja en una disminución de la dosis de N a recomendar. Variable de poca consideración al momento de determinar la dosis de N. La literatura señala, que en promedio los cultivos usan normalmente entre el 40 a 50% del fertilizante nitrogenado (Osmond *et al.*, 2004). Sin embargo, en nuestras condiciones de clima y manejo, el *Ef* no supera el 30% y en estudios de maíz bajo las mismas formas de aplicación utilizadas en el presente estudio, se obtuvieron valores de 24% (Delgado *et al.*, 2004).

La variación en los requerimientos de N como fertilizante estimado por el NuMaSS producto de la modificación del porcentaje de *Ef*, muestra la importancia que este parámetro tiene en la determinación de la dosis y la necesidad de aumentar su valor, mediante prácticas de manejo del suelo y del cultivo.

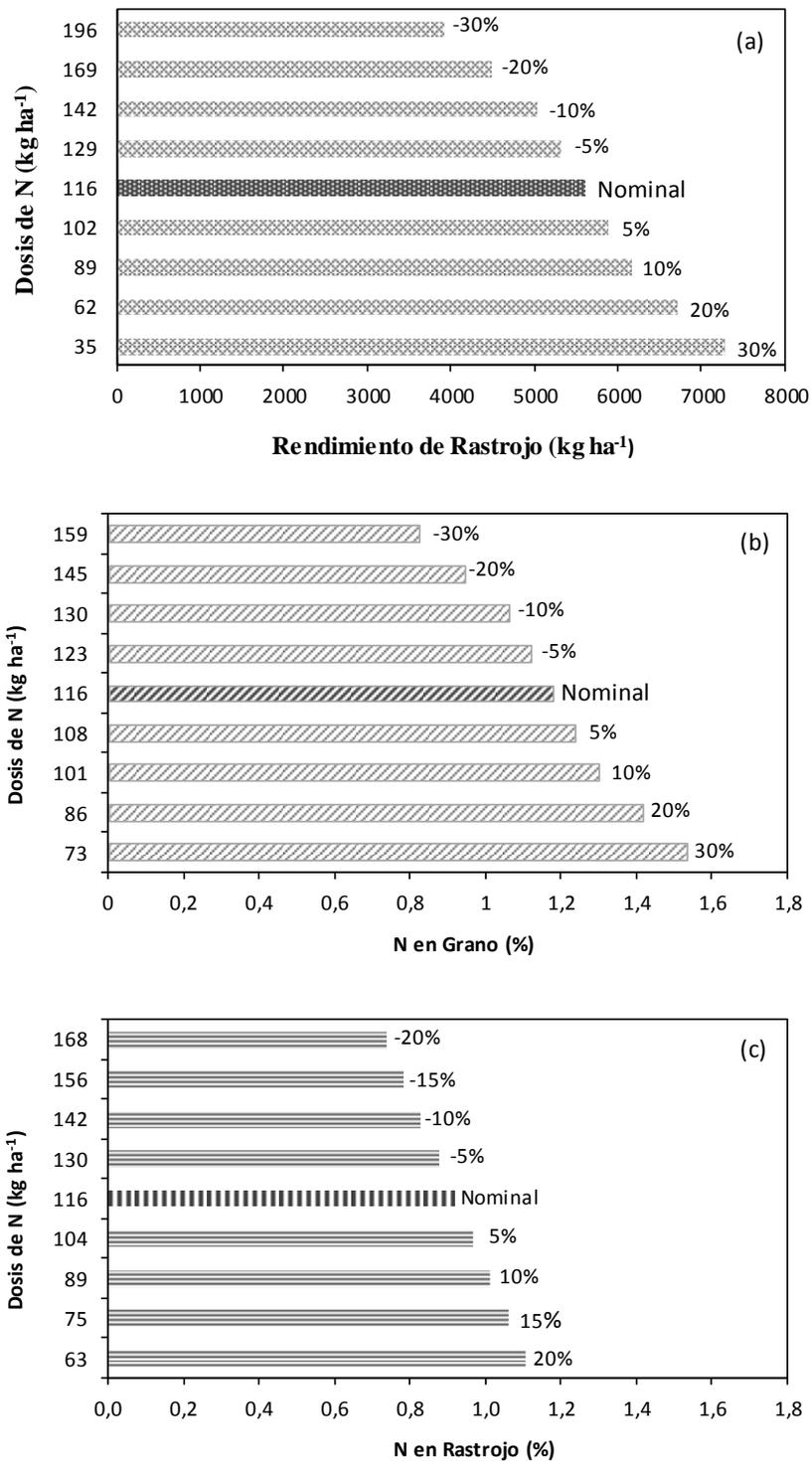


Figura 30. Análisis de sensibilidad de las variables que modifican la estimación de la dosis.

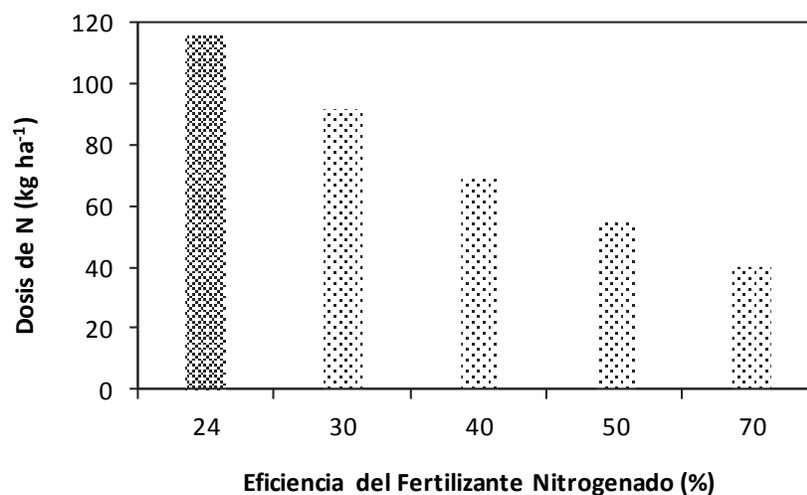


Figura 31. Análisis de sensibilidad para la eficiencia de uso del fertilizante.

De acuerdo al análisis de sensibilidad, variaciones en los parámetros de cantidad de rastrojo, contenido de N en grano y rastrojo y eficiencia del fertilizante producen variación en la dosis N generada por el NuMaSS. En las Figuras 30 y 31, se puede observar que por cada incremento en 10% o más de Y_s , N_g y N_s , y E_f , se disminuye la dosis de N a recomendar en 27, 15, 27 y 24 kg ha⁻¹, respectivamente, lo que demuestra la importancia que tiene la producción de materia seca y su contenido de N en la determinación de la dosis y denota la necesidad de que sea cuantificada con precisión.

V- CONCLUSIONES

- El NuMaSS demostró ser un programa de fácil manejo y generó resultados razonables para la predicción de la dosis de N, en condiciones variables de N inicial en el suelo.
- El NuMaSS tiene un uso potencial para evaluar el N absorbido por el cultivo en función de la disponibilidad de este nutriente en el suelo, estimado mediante la cantidad de N en grano y rastrojo de un cultivo de maíz sin fertilizar.
- Para su aplicación siempre se requiere el dato del cultivo previo sin fertilizar, esto suministra la disponibilidad de N por el suelo para el cultivo.
- La estimación del N disponible para el cultivo en función de la mineralización de la materia orgánica, predijo dosis muy altas y diferentes a las dosis derivadas de campo.
- Las dosis de N generadas por el NuMaSS resultaron diferentes a las dosis de N derivadas del ensayo en campo, como consecuencia de alto contenido de N inicial en el suelo, lo cual evidencia su limitada utilidad como técnica de diagnóstico y recomendación para maíz bajo estas condiciones.
- La dosis de N estimada por el NuMaSS resultó sensible a la cantidad de materia seca y concentración de N en rastrojo, lo que requiere que sean determinados con precisión y en forma rutinaria al final del cultivo.

APÉNDICE

IV. 1. Cálculo para el N requerido como fertilizante, Método 1, por el NuMaSS.

<p>Resultados – Predicción- NuMaSS, Método 1.</p> <p>CÁLCULOS DEL N DEL SUELO</p> <p>N_Suelo - del rendimiento del cultivo anterior: No se fertilizó (Método 1). El Cultivo Deseado y el Cultivo Anterior son el mismo. El Cultivo Anterior no fue fertilizado. El usuario ha ingresado:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ el rendimiento reproductivo del cultivo anterior▪ porcentaje de N de la parte reproductiva del cultivo anterior▪ rendimiento vegetativo del cultivo anterior.▪ porcentaje de N de la parte vegetativa del cultivo anterior <p>- N_Suelo fue calculado de:</p> <p>Rendimiento Reproductivo Incluido del Usuario 3147,49 Rendimiento Grano Incluido del Usuario a 15% de humedad <Yg_User = 2675 Rendimiento de Rastrojo de los Cultivos de Grano No-Leguminosos Incluido del Usuario <Ys_User = 6094 Porcentaje N del rendimiento de grano incluido del usuario <percent_Ng_User = 1,09 Porcentaje N del rendimiento de rastrojo incluido del usuario <percent_Ns_User = 0,87</p> <p><u>N_Soil = 82</u></p> <p>- Informe del cálculo enmienda_N_planta: Tipo de residuo de planta: maize Cantidad de residuos de planta: 6095 %N del residuo de plantas del usuario: 0,87 Nota: el contenido del N disponible para la planta se redujo en 50% debido a que el material orgánico no se incorporó dentro del suelo y la pérdida de N al aire ocurrió a través de la volatilización.</p> <p>N disponible para el cultivo en las enmiendas = 13 kg/ha</p> <p>N DISPONIBLE PARA EL CULTIVO Cantidad de N_Suelo absorbido por la planta = 82 kg/ha Cantidad de N_enmiendas absorbido por la planta = 13 kg/ha N_Disponible_Planta = 95 kg/ha</p>
<p>REQUERIMIENTOS DE N DEL CULTIVO</p> <p>Rendimiento reproductivo incluido por el usuario = 5128,24 Rendimiento Grano Incluido del Usuario a 15% de humedad <Yg_User> = 4359 Rendimiento de Rastrojo Incluido del Usuario <Ys_User> = 6275 Porcentaje N del Rendimiento Grano Incluido del Usuario <percent_Ng_User> = 1,41 Porcentaje N del Rendimiento Rastrojo Incluido del Usuario <percent_Ns_User> = 1,04</p> <p>N_Crop = 127</p>
<p>N ADICIONAL NECESARIO PARA EL CULTIVO</p>

(REQUERIMIENTOS DE N DEL CULTIVO - N DISPONIBLE PARA EL CULTIVO)

Se calculó el N_Necesario_Cultivo de:

N_Crop = 127

N_Plant_Available = 95

N_Crop_Needed = 31

FERTILIZANTE N NECESARIO

Informe de cálculo NFert_Necesario:

NFert_Needed = 130 kg/ha

IV.2. Cálculo para el N requerido como fertilizante, Método 4, por el NuMaSS

Resultados – Predicción- NuMaSS, Método 4.

CÁLCULOS DEL N DEL SUELO

N_Suelo - del rendimiento del cultivo anterior: Se fertilizó (Método 2).

Se obtuvo un valor de Densidad Aparente - incluido por el Usuario:

Densidad Aparente = 1,7

Se obtuvo un valor de % N del suelo - %MO del Suelo del Usuario:

% N Suelo = 0,07

- N_Suelo fue calculado de:

BD = 1,7

% N Suelo = 0,07

Tasa de Mineralización = 2

Duración del Ciclo del Cultivo = 4

N_Soil = 12

- Informe del cálculo enmienda_N_planta:

Tipo de residuo de planta: maize

Cantidad de residuos de planta: 5894,35

%N del residuo de plantas del usuario: 0,76

Nota: el contenido del N disponible para la planta se redujo en 50% debido a que el material orgánico no se incorporó dentro del suelo y la pérdida de N al aire ocurrió a través de la volatilización.

N disponible para el cultivo en las enmiendas = **11 kg/ha**

N DISPONIBLE PARA EL CULTIVO

Informe del cálculo de N_Disponible_Planta:

Cantidad de N_Suelo absorbido por la planta = 12 kg/ha

Cantidad de N_enmiendas absorbido por la planta = 11 kg/ha

_N_Disponible_Planta = 23 kg/ha

REQUERIMIENTOS DE N DEL CULTIVO

N_Cultivo se cálculo de:

Rendimiento reproductivo incluido por el usuario = 5128,24

Rendimiento Grano Incluido del Usuario a 15% de humedad <Yg_User> = 4359

Rendimiento de Rastrojo Incluido del Usuario <Ys_User> = 6275

Porcentaje de N del Rend. de Grano Incluido del Usuario <percent_Ng_User> = 1,41

Porcentaje de N del Rend.e Rastrojo Incluido del Usuario <percent_Ns_User> = 1,04

_N_Crop = 127

N ADICIONAL NECESARIO PARA EL CULTIVO

-Informe Eficiencia del Uso de Fertilizante Nitrogenado:

N_Fert_Eff = 24

Se calculó el N_Necesario_Cultivo de:

N_Crop = 127

N_Plant_Available = 23

N_Crop_Needed = 104

FERTILIZANTE N NECESARIO

Informe de cálculo NFert_Necesario:

NFert_Needed = 432 kg/ha

CAPÍTULO V

DETERMINACIÓN DE DOSIS DE N PARA MAÍZ EMPLEANDO EL MODELO INIA EN LA LOCALIDAD DE YARITAGUA DEL VALLE MEDIO, ESTADO YARACUY

I. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de nitrógeno en el suelo y sus requerimientos por el maíz definen, en gran parte, la cantidad o dosis de N que debe ser aplicada como fertilizante para obtener rendimientos máximos.

En Venezuela el procedimiento normal para la recomendación de fertilizante nitrogenado se basa en estudios de respuesta del cultivo a la aplicación de dosis crecientes del elemento, la cual es afectada, comprensiblemente por la disponibilidad en el suelo. Sin embargo, algunos avances se han realizado en la introducción de otros parámetros de suelo como el N mineral, en los mecanismos de determinación de requerimiento de N como fertilizante (Delgado, 2001). Más aun, la disponibilidad de N en el suelo es afectada por diferentes procesos como mineralización, drenaje, volatilización, desnitrificación; aspectos de manejo como fertilización nitrogenada, y por aspectos climáticos como el patrón e intensidad de las lluvias, lo que sugiere que los estudios de respuesta presentan limitaciones para definir la cantidad necesaria de N fertilizante, además que estos no son capaces de considerar la variabilidad que ocurre en el aporte de agua y nutrientes durante el ciclo del cultivo (Álvarez, 2002).

Estos planteamientos destacan los siguientes aspectos: *i*) la complejidad asociada al diagnóstico del N disponible en el suelo, debido a la diversidad de parámetros de suelo, cultivo, clima y manejo que la afectan, y *ii*) la necesidad de diseñar mecanismos integrales y en escalas de tiempo que permitan su empleo en el desarrollo de estrategias para mejorar el desempeño de los cultivos, que faciliten su

diagnóstico, y sustenten su empleo en procesos de recomendación de la fertilización nitrogenada.

Diversos mecanismos se han puesto en marcha para integrar los diferentes factores y procesos que afectan la disponibilidad de nitrógeno para los cultivos, la estimación de dosis de fertilización apropiadas y la evaluación de estrategias para aumentar la eficiencia de uso del fertilizante. Uno de dichos mecanismos son los modelos de simulación, los cuales permiten enfatizar la investigación basada en los procesos y en el estudio de componentes, en lugar del método de ensayo y error de la experimentación de campo (Bowen *et al.*, 2001). En este contexto, los modelos de simulación permiten completar la información experimental, así como evaluar y desarrollar prácticas de fertilización nitrogenada adecuada (Ferrer *et al.*, 2000).

En tal sentido, Miao *et al.* (2006), utilizaron el modelo CERES-Maize para la determinación de dosis de N, económicamente óptimas, específicas para determinadas áreas de manejo. En otros estudios Álvarez *et al.* (2004) destacan la importancia de integrar diferentes componentes y procesos de suelo, cultivo y clima para la estimación de dosis de N, para lo cual desarrollaron un modelo empírico para trigo en las pampas de Argentina. Otras investigaciones han desarrollado algoritmos, en los cuales se utilizan parámetros como el rendimiento promedio esperado, la concentración promedio de nitrato en el suelo y el contenido de materia orgánica del suelo como insumo de los programas destinados a determinar dosis a recomendar (Ferguson *et al.*, 2002).

Otro ejemplo de desarrollo y utilización de mecanismos integrales para el manejo de la fertilización nitrogenada lo presentaron Setiyono *et al.* (2011), quienes estimaron la tasa o dosis económicamente óptima de N, basada en la integración de aspectos climáticos, manejo del cultivo, parámetros del cultivo, suministro de N por el suelo y respuesta del cultivo a la aplicación de N, entre otros factores.

En Venezuela, Delgado y Núñez (2005) desarrollaron una experiencia fundamentada en la modelización del crecimiento del maíz y disponibilidad de N en el suelo, con base en los requerimientos actuales y potenciales de N por el cultivo, la disponibilidad de agua, las principales características climáticas durante el ciclo del

cultivo, algunos aspectos de manejo, tales como riego y densidad de siembra, y la aplicación de residuos orgánicos. Este estudio apoyó el desarrollo del modelo de simulación INIA-CENIAP.

En el presente estudio se planteó la evaluación de la capacidad del modelo INIA para predicción de dosis de N en diferentes condiciones de disponibilidad de N en el suelo, en la localidad de Yaritagua del valle medio del Río Yaracuy, estado Yaracuy, donde se ha creado una condición o gradiente de N mineral en el suelo.

Objetivo General

Validar el modelo de simulación INIA como sistema de recomendación para la fertilización nitrogenada del maíz

Hipótesis

Debido a que los modelos de simulación son técnicas integrales del sistema suelo-cultivo-clima-manejo y considerando el contenido de N en el suelo, los procesos que los afectan y los requerimientos del cultivo, será posible predecir la necesidad de aplicación del nitrógeno requerido para el cultivo de maíz en la localidad de El Rodeo, municipio Peña, del valle medio del Río Yaracuy, del Estado Yaracuy.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. Modelos de Simulación Agronómicos

Los modelos de simulación agronómicos son herramientas valiosas y de alta potencialidad para la investigación agrícola y para la toma de decisiones sobre las mejores prácticas de manejo del suelo y cultivo. En este sentido, pueden ser utilizados para facilitar el proceso de búsqueda de aquellas prácticas agrícolas que permitan aumentar la sustentabilidad de los agroecosistemas y optimizar el uso de los insumos agrícolas (Bowen *et al.*, 2001).

Los modelos de simulación permiten acercarse a los resultados de una serie de interacciones complejas que afectan el sistema de producción, su funcionamiento, características y respuesta a diversas condiciones del entorno. Permiten aproximaciones cuantitativas, funcionales y dinámicas de diversos procesos que ocurren en los agrosistemas y evalúan el desempeño de sistemas de producción y prácticas de manejo en diferentes condiciones agroecológicas.

El nitrógeno, considerado el nutriente más importante para la producción del maíz debido a las cantidades requeridas por el cultivo y a la frecuencia con que se observan deficiencias en los suelos agrícolas, exige establecer sistemas de recomendación de dosis y manejo a nivel específico de lote y/o zona de lote.

La cantidad de formas, tasa de transformaciones y de factores que afectan este elemento, determina el alto grado de complejidad que presenta el estudio de este nutriente, ésto además hace que la cuantificación de estos factores y que la predicción de la respuesta del N agregado sea una tarea difícil (Godwin y Jones, 1990).

García y Deverede (2006), afirmaron que los modelos de simulación constituyen una herramienta muy promisoría para el manejo eficiente del N en el sistema suelo-planta, ya que integran los factores de suelo, clima y manejo que afectan la dinámica del elemento y el crecimiento y rendimiento del cultivo. Pueden simular rápidamente diversas estrategias de manejo del cultivo y los fertilizantes, lo que conlleva a mejoras sensibles en la eficiencia de la toma de decisiones para la fertilización (Godwin y Jones, 1990).

Avances significativos se han realizado en la simulación de la dinámica del N, C y materia orgánica en el suelo. Entre los modelos más conocidos se pueden señalar, el Century (Parton *et al.*, 1988), el Rothamsted (Rothamsted Nitrogen Turnover Model) con una versión-PC llamada SUNDIAL (Simulation of Nitrogen Dynamics In Arable Land) (Bradbury *et al.*, 1993); el CERES (Crop-Environment Resource Synthesis), EPIC (Erosión Productivity Impact Calculator), entre otros. En Venezuela, el modelo del INIA, simula la dinámica de N en el suelo y predice la dosis de N (Delgado y Núñez, 2005).

Por lo tanto el estudio de estos modelos permite evaluar su utilidad como un sistema de orientación para la recomendación de fertilización nitrogenada y su uso como base en estudios sobre el ciclo del N y su dinámica en los diferentes sistemas de producción.

2. Descripción del modelo INIA y aspectos relevantes asociados a la determinación de la dosis de N.

El modelo INIA simula el contenido de N disponible en el suelo, la producción de biomasa aérea y de grano y la disponibilidad de agua para el maíz, con base en información diaria de la mineralización de las fracciones orgánicas, la producción potencial de la biomasa (materia seca) y el contenido de humedad en las diferentes profundidades del suelo, esta información es utilizada para estimar la cantidad de N requerido como fertilizante.

El modelo INIA consta de submodelos, uno para estimar la disponibilidad de N para el cultivo, la producción de biomasa aérea y grano y un submodelo para la predicción de la dinámica y disponibilidad de agua en el suelo, en diferentes escenarios agroecológicos y de manejo. Las salidas del modelo incluyen parámetros de crecimiento del cultivo, del balance hídrico y del N en el suelo (Delgado, 2010).

2.1. Estimación del N disponible en el suelo:

El diagrama de modelización para el submodelo disponibilidad de N en el suelo se presenta en la Figura 32, el cual indica los principales parámetros y procesos que afectan la disponibilidad del N en el suelo. La estimación diaria del N mineral

disponible para el cultivo (N_{hi}), en una base de profundidad por profundidad (i), se considera 1) la translocación vertical descendente de las formas minerales del N entre las diferentes profundidades del suelo asociada al movimiento del agua, 2) la absorción del elemento por el cultivo, 3) el N proveniente de la mineralización de formas orgánicas de diferente accesibilidad (calidad) a los descomponedores del suelo, 4) el N proveniente de fuentes minerales o fertilizantes, y 5) la inmovilización del N mineral en fracciones orgánicas activas.

Entre las formas orgánicas que se mineralizan y proveen N para el cultivo, se considera la cantidad, calidad y distribución en el perfil del suelo de residuos de cosecha. La repartición de estos residuos entre la fracción que permanece en la superficie del suelo y la que es incorporada dentro del suelo, se realiza según la intensidad de labranza, como lo sugiere Stott (1991) y se distribuyen entre las fracciones: 1) de fácil descomposición (DPM), 2) estructural, intermedia descomposición (SPM), y 3) recalcitrante o de difícil mineralización (RPM), como lo sugiere Verberne *et al.* (1990). La proporción de DPM, SPM y RPM en los residuos, así como la relación C:N, esta última como un indicador de calidad, son suministrados como parámetros de entrada por el usuario.

El modelo considera la materia orgánica del suelo (MOS) como fuente de N para restablecer el N mineral. En el mismo se considera que la MOS está constituida por: a) una fracción de fácil a mediana descomponibilidad (FracClabil), b) una fracción de lenta mineralización, c) una fracción recalcitrante (FracCrestable) de muy lenta mineralización, la cual en este modelo se considera inerte en el suministro de N para cultivos de ciclo corto, y d) la fracción orgánica activa (FracCActiva), representada por la biomasa microbiana. La cantidad de N en las diferentes fracciones indicadas previamente, se basa en la cantidad relativa de éstas en relación al N total del suelo (NT) presente en cada profundidad, según la categorización de los suelos en su capacidad para suplir el elemento, en el grupo de alta o baja capacidad de suministro de N (ACSN, y BCSN, respectivamente), sustentada en la relación significativa observada entre el índice $\%MOS \cdot N_{labil}$ y el N disponible en el suelo (Delgado, 2003).

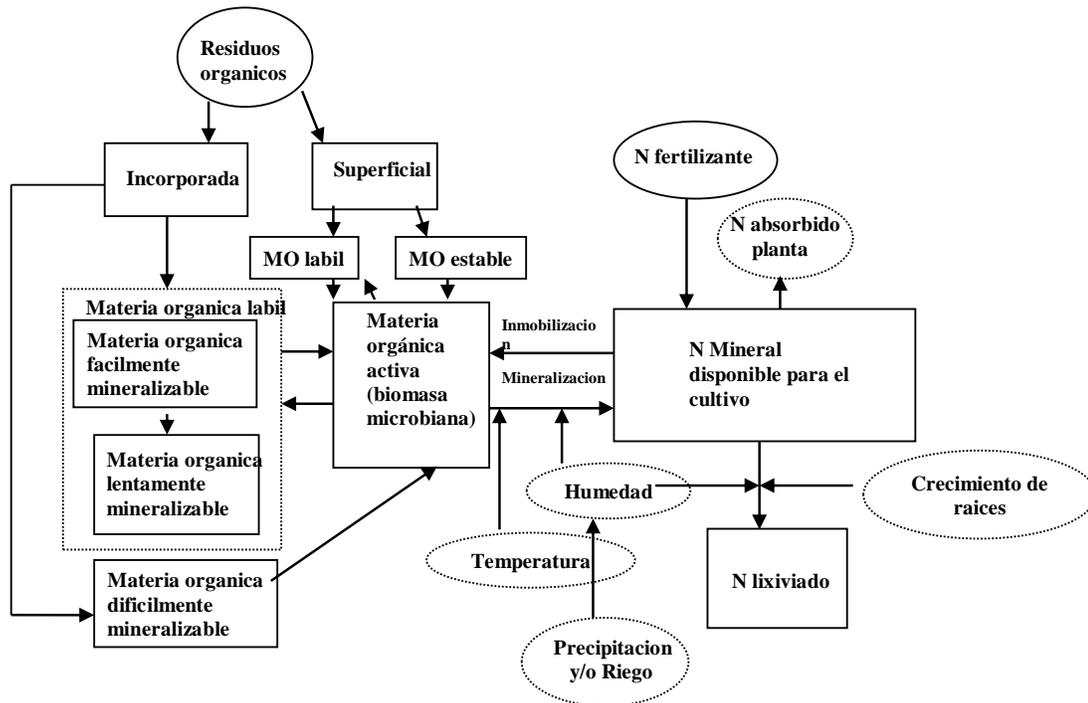


Figura 32. Factores y procesos considerados en la determinación de N disponible en el suelo. Fuente: Delgado y Núñez (2005).

En el modelo, la fracción o compartimiento de materia orgánica activa, o biomasa microbiana, como ya se indicó constituye un sumidero de carbono y nitrógeno en el suelo, y se incrementará o disminuirá diariamente dependiendo de: 1) la disponibilidad de sustratos de carbono (residuos de cosecha o materia orgánica) para la mineralización y de la eficiencia de asimilación del C; 2) del N disponible para la síntesis de nueva biomasa microbiana, el cual puede provenir de la materia orgánica que es mineralizada y del N mineral disponible en el suelo, 3) de la disponibilidad de agua en el suelo, y 4) de la tasa de mortalidad diaria natural de la biomasa. Si la cantidad de N proveniente de la mineralización del compuesto orgánico es mayor a la requerida para la síntesis diaria de biomasa microbiana, el exceso será liberado al suelo y se estaría en una condición de mineralización neta positiva, por el contrario si es menor a la requerida, y es necesario la utilización del N

mineral disponible en el suelo, ocurrirá inmovilización de N. La biomasa microbiana que muere diariamente debido a mortandad natural o efecto de déficit hídrico en el suelo, se adiciona al compartimiento orgánico de la MOS de fácil mineralización (FracClabil).

Para la mineralización prevista en los distintos compartimientos orgánicos de la MOS y de los residuos orgánicos incorporados en las diferentes profundidades del suelo, el modelo utiliza un factor de mineralización relativo (FactorMR) que varía entre 0 y 1 que afecta la tasa de mineralización inicialmente introducida para cada uno de los compartimientos orgánicos considerados. La Figura 33 muestra las tasas de mineralización relativas promedio de diferentes suelos y que se considera el factor que afecta la tasa de mineralización a medida que se profundiza en el perfil (FactorMR).

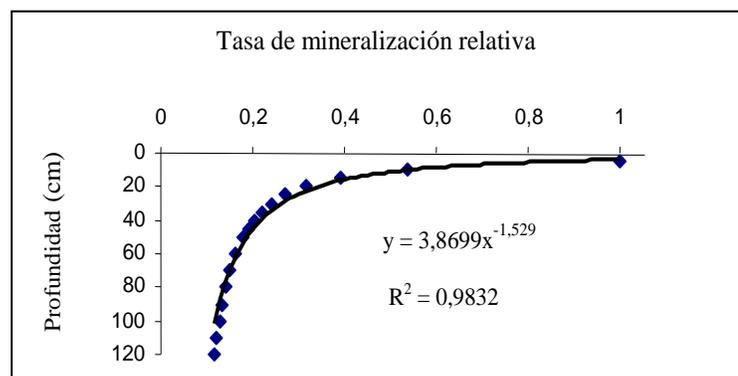


Figura 33. Tasa de mineralización relativa promedio a través del perfil del suelo (factorMR).

2.2. Disponibilidad de agua en el suelo

El contenido de agua disponible en cada capa, así como el agua que fluye diariamente de una profundidad a otra, se estima mediante un submodelo que simula diariamente la dinámica y disponibilidad de agua en el suelo, como lo describe Delgado (2010).

El submodelo considera el impacto que tiene el contenido de humedad del suelo, profundidad por profundidad y con base diaria, en la mineralización de los diferentes compartimientos orgánicos. El índice o parámetro que afecta la tasa de mineralización, asociado a la humedad del suelo, se basa en la relación encontrada por Linn y Doran (1984), en la que la actividad microbiana relativa (AMR) es afectada por la proporción del espacio poroso total del suelo que es ocupada por agua (%EPOA). Este índice es estimado diariamente para cada profundidad del suelo y varía entre 0 y 1. La Figura 34 ilustra la relación entre AMR y %EPOA.

En este modelo la descomposición de los diferentes compartimientos orgánicos sigue un patrón de primer orden, donde cada compartimiento orgánico presenta una tasa de descomposición constante específica, y se asume que cada uno de los compartimientos orgánicos se mineraliza independientemente de los otros (Paustian *et al.*, 1997). Debido a las diferencias en calidad de los compartimientos orgánicos, la mineralización diaria de éstos, se basa en: 1) la utilización de tasas de mineralización potencial diaria empírica y específica para cada compartimiento descrito, 2) el impacto del contenido diario de humedad, basado en la proporción de la porosidad total ocupada por agua, 3) un factor que considera la variación de la tasa de mineralización debido a la profundización en el perfil del suelo y 4) el N disponible para formar nueva biomasa microbiana proveniente del material en descomposición, y del N mineral disponible en el suelo.

La cantidad de material orgánico potencialmente mineralizado diariamente ($C_{minSupDPMi1}$), tomando como ejemplo el compartimiento de residuos fácilmente mineralizable (DPM), es calculada de acuerdo a la Ecuación 1 y de manera similar para todos los compartimientos orgánicos de la MOS del suelo y residuos de cosecha incorporados en el suelo:

$$C_{minSupDPMi1} = DPMi1 * MRDPMi * AMR * FactorMR \quad (1)$$

donde, DPM es la cantidad de sustrato orgánico disponible, $MRDPM$ es la tasa de mineralización específica del compartimiento DPM , AMR factor que afecta la tasa de mineralización, al relacionar la actividad microbiana relativa con la porosidad total ocupada por agua, y $FactorMR$ que afecta la tasa de mineralización debido a la

profundidad en el perfil del suelo, descritos anteriormente. La descomposición diaria de los residuos de cosecha no incorporados, se estima de manera similar a lo indicado en la Ecuación 1, con la diferencia que no es afectada por *FactorMR*.

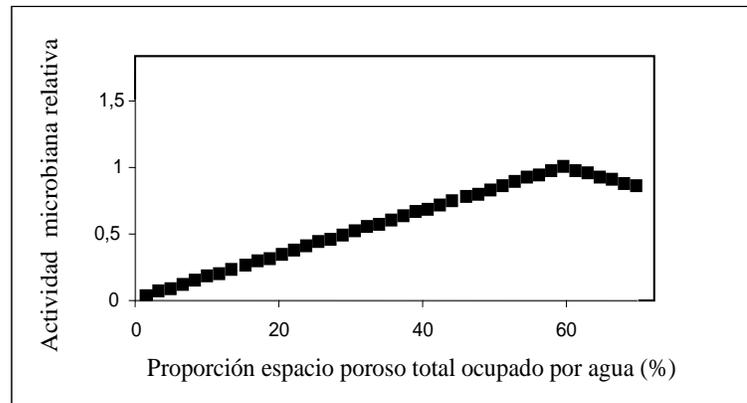


Figura 34. Actividad microbiana relativa (AMR) en función del espacio poroso total ocupado por agua. Fuente: Linn y Doran (1984).

La cantidad del compartimiento orgánico que realmente se mineraliza diariamente dependerá de la cantidad de N disponible para la síntesis de nueva biomasa microbiana, derivado del material orgánico mineralizado y del N mineral lábil disponible en el suelo.

El modelo INIA predice tres situaciones para estimar la cantidad de sustrato orgánico que realmente se mineraliza diariamente, y la mineralización neta positiva o inmovilización microbiana basado en: 1) la cantidad de N proveniente de la fracción de material orgánico potencialmente mineralizado y la relación C:N de este material, 2) el N mineral disponible en el suelo, y 3) el N requerido para la síntesis microbiana que utiliza la relación C:N promedio de la biomasa microbiana en el suelo.

Mineralización neta positiva: Si el N proveniente del residuo o compartimiento potencialmente mineralizado ($N_{dispBioDPM}$), estimado en función de la relación C:N específica del compartimiento que se mineraliza y de la cantidad de residuo mineralizado ($C_{minSupDPM1}$) de acuerdo a la Ecuación 2, es superior al N requerido

($NreqdCBioDPM$) (Ecuación 3) para la síntesis de la nueva biomasa microbiana ($dCBiomassSupDPM$) (Ecuación 4) a partir del C mineralizado, empleando una eficiencia de utilización del C mineralizado ($effi$), entonces la cantidad de compuesto orgánico que se mineraliza será similar a la potencialmente mineralizada y habrá mineralización neta positiva con un exceso de N proveniente de la mineralización del compartimiento orgánico ($N_minSupDPM$) (Ecuación 5), que incrementará el N mineral lábil disponible en el suelo ($N1h1$) (Ecuación 6).

$$NdispBioDPM = CminSupDPM1 * 0,46 * (1/CNdpm) \quad (2)$$

$$NreqdCBioDPM = dcBiomassSupDPM * (1/RelCNBio) \quad (3)$$

$$dCBiomassSupDPM = (cminSupDPM * 0,46) * effi/100 \quad (4)$$

$$N_minSupDPM = NdispBioDPM - NreqdCBioDP \quad (5)$$

$$N1h1 = N1h1 + N_minSupDPM \quad (6)$$

Inmovilización microbiana: 1) Si el N proveniente del compartimiento potencialmente mineralizado ($NdispBioDPM$) es inferior al requerido para la síntesis de la biomasa microbiana ($NreqdCBioDPM$), pero la suma de $NdispBioDPM$ con el N mineral lábil ($N1h1$) del suelo es superior o igual al requerido para la síntesis de la biomasa microbiana, la cantidad de compartimiento que se mineraliza será similar a la potencialmente estimada, aunque habrá inmovilización de N mineral del suelo ($N_MinImmbdDPM1$), con decrecimiento del N lábil del suelo ($Nh1$) (Ecuación 7).

$$N1h1 = N1h1 - N_MinImmbdDPM1 \quad (7)$$

2) Por otra parte, si el $NdispBioDPM$ mas $Nh1$, es inferior al requerido $NreqdCBioDPM$, entonces la cantidad del compartimiento orgánico que efectivamente se mineraliza será reestimado (Ecuación 8), la cual es un despeje de la Ecuación 4 indicada previamente, en función de la biomasa microbiana que puede ser sintetizada con el N disponible ($NdispBioDPM + Nh1$) como se indica en la Ecuación 9 y en este caso también habrá inmovilización del N mineral del suelo, lo que conlleva a una disminución del N mineral disponible en el suelo para el cultivo, en este caso $Nh1$ será igual a 0.

$$CminSupDPM = dCBiomassSupDPM / (0,40 * (effi/100)) \quad (8)$$

$$dCBiomassSupDPM = RelCNBio * (N1h1 + NdispBioDPM) \quad (9)$$

2.3. Estimación de la cantidad diaria de nitrógeno absorbida por el cultivo.

En este submodelo, la absorción diaria de N por el cultivo ($NAbdiaria$) se estima a partir del compartimiento de N mineral disponible en cada uno de las profundidades del suelo (h) utilizando la cantidad de agua absorbida ($aguaAbdiaria(h)$) y la concentración de N ($Nlh(h)$), como se indica en la Ecuación 10. Finalmente la cantidad total de N absorbida diariamente por el cultivo ($NTAbdiaria$), se estima por la sumatoria del N absorbido desde cada profundidad ($NAbdiaria$) donde existen raíces (Ecuación 11).

$$NAbdiaria(h) = aguaAbdiaria(h) + Nlh(h) \quad (10)$$

$$NTAbdiaria = \sum_0^{ProfRaíz} NAbdiaria(h) \quad (11)$$

El $aguaAbdiaria(h)$ desde cada profundidad donde existan raíces se estima diariamente y capa por capa de suelo, en este modelo según lo describe Delgado (2003), en función de una tasa potencial de transpiración diaria por unidad de longitud radicular (Tpd), un índice relativo normalizado de la densidad radicular ($NormRLDI$) el cual varía entre 0 y 1, y un índice de estrés hídrico en cada profundidad ($\alpha(z)$), el cual se basa en la comparación del contenido de humedad diario en cada profundidad ($\% \theta$) contra los contenidos de humedad equivalentes a saturación (θ_{sat}), capacidad de campo (θ_{cc}), punto de marchitez permanente (θ_{pmp}), y un contenido de humedad variable ($MinHumLim$) según Skaggs *et al.* (2006), dependiente de la demanda del cultivo, el cual en este modelo, se introduce como un parámetro del cultivo.

2.4. Estimación de producción de Biomasa aérea y Producción de Grano

En este submodelo la producción diaria de biomasa (expresada como materia seca) se estima en función de la producción potencial diaria de biomasa ($BioPotDiaria$), y la disponibilidad de agua y N. La $BioPotDiaria$ se calcula en función de la radiación solar diaria ($SolRad$), la eficiencia de utilización de la radiación solar (RUE) específica del cultivo, la radiación fotosintéticamente activa (PAI), la radiación efectivamente absorbida ($PAIab$), el área foliar diaria por planta ($AreaFolidiaria$), y la densidad de plantas por superficie ($PltDens$), Ecuación 12.

$$BioPotDiaria = (RUE * PAI * PAIab) * SolRad * 0,00000000419 * PltDens * AreaFolidiaria \quad (12)$$

En este modelo se considera que la *BioPotDiaria* es afectada por *AreaFolidiaria* hasta que alcanza una área foliar óptima, esta última calculada en función de un índice de área foliar óptimo específico para el cultivo (OptIAF), el cual se ingresa como un parámetro del cultivo, por encima de la cual no se incrementa la producción diaria de materia seca, es constante.

Como se indicó previamente, *BioPotDiaria* se ajusta en función de la disponibilidad diaria de agua y la disponibilidad de N para crecimiento. Primero el modelo ajusta la producción de materia seca a la disponibilidad de agua, para lo cual se calcula el agua potencial requerida (*AguaPotdiaria*), según la Ecuación 13, mediante un índice que relaciona el agua requerida para la producción de una unidad de masa de materia seca (*FactConvMSAgua*) y que es indicado por el usuario en el archivo de parámetros de cultivo. Si el agua disponible en el suelo para la producción diaria de biomasa (*TrSWA*) sobrepasa al *AguaPotdiaria*, la producción potencial diaria de biomasa (*BioPotDiaria*) se mantiene, si por el contrario es inferior, entonces la biomasa a producirse diariamente será la permitida por *TrSWA*, Ecuación 14.

$$AguaPotdiaria = BioPotDiaria * FactConvMSAgua \quad (13)$$

$$BioPotDiaria = TrSWA / factConvMSAgua \quad (14)$$

Una vez que se ha ajustado la producción diaria de biomasa debida a la disponibilidad de agua, se contrastan los requerimientos de N para cubrir la producción potencial diaria de biomasa, con el N disponible para la producción de nueva biomasa. En este modelo la cantidad de N disponible diariamente para la producción de biomasa se estima en función del N previamente presente en la planta, parte del cual puede ser removilizado, y del N que es absorbido diariamente a través del sistema radical como se indicó previamente.

La cantidad de N que puede ser removilizado diariamente (Nremovilizable) y que podría ser utilizado para la producción diaria de nueva biomasa se estima considerando que existe una concentración de N mínima en el tejido foliar por debajo de la cual ésta no decrece.

En el submodelo, para determinar la cantidad de N que puede ser removilizado diariamente y utilizado para la formación de materia seca, se utilizó la relación C:N mínima y máximo (CN_{max} y CN_{min} , respectivamente) en función de los grados térmicos acumulados durante el ciclo del cultivo maíz, obtenida de una condición de crecimiento del cultivo sin limitación de N mediante la aplicación de 180 kg N ha^{-1} y de otra con limitación de N debido a que no se aplicó N (0 kg N ha^{-1}), en estudios conducidos por Delgado (2002b) en la localidad de Maracay y Turén de los estados Aragua y Portuguesa (Figura 35).

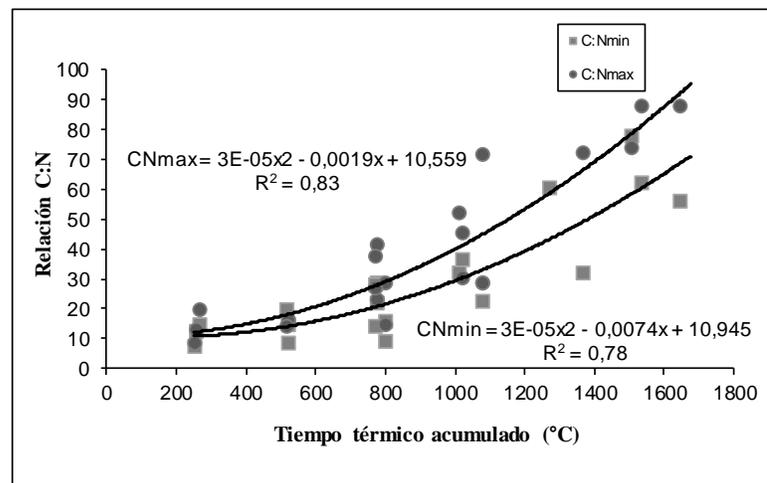


Figura 35. Dinámica de la relación Carbono:Nitrógeno durante el ciclo de maíz en la condición con y sin limitación de disponibilidad de N.

Mediante el uso de la relación $C:N_{max}$, con el uso de una concentración de C constante (0,46), y con la biomasa producida en un tiempo determinado durante el ciclo del cultivo, es posible obtener la cantidad de N mínima que permanece inmóvil en la planta ($N_{minPlant}$) como se indica en la Ecuación 15, y por diferencia entre el N que existe en la planta (NR_{planta}) y $N_{minPlant}$ se obtiene el N que se puede removilizar para nuevo crecimiento de biomasa diariamente ($N_{removilizable}$), Ecuación 16.

$$N_{minPlant} = Dmd * 0,46 / CN_{max} \quad (15)$$

$$N_{removizable} = NR_{planta} - N_{minPlant} \quad (16)$$

La cantidad total de N disponible diariamente para la formación de nueva materia seca ($N_{diarioNuevaMS}$) es calculada del N total absorbido diariamente desde el suelo ($NT_{Abdiaria}$) y $N_{removizable}$, (Ecuación 17).

$$N_{diarioNuevaMS} = NT_{Abdiaria} + N_{removizable} \quad (17)$$

En el proceso de comparación del N requerido diariamente para cubrir el requerimiento $BioPotDiaria$, se calcula la cantidad mínima ($MinNreq$) y máxima ($MaxNreq$) de N requerida para cubrir la producción potencial de la biomasa, previamente estimada y afectada por la disponibilidad de agua en el suelo (Ecuaciones 18 y 19). En el modelo se estima que la biomasa contiene un 80% de agua, y los cálculos que se indican se realizan para un 20% de la biomasa que se considera materia seca (MS). Además se considera que MS contiene un 46 % de carbono en promedio.

$$MinNreq = (1/CN_{max}) * (BioPotDiaria) * 0,46 \quad (18)$$

$$MaxNreq = (1/CN_{min}) * (BioPotDiaria * 0,46) \quad (19)$$

Finalmente, la producción diaria de MS afectada por la disponibilidad de N, se obtiene mediante la comparación entre el N disponible para producción diaria de biomasa ($N_{diarioNuevaMS}$) y los requerimientos de N para la producción potencial de biomasa (Ecuaciones 18 y 19), como se indica en la Ecuación 20.

$$MS \text{ diaria} \quad (20) \quad \left\{ \begin{array}{ll} \leq 0. & \text{Si } N_{diarioNuevaMS} \leq 0. \\ = p_{DailyBiomass} & \text{Si } N_{diarioNuevaMS} \geq MaxNreq \\ = N_{diarioNuevaMS} * CN_{max} & \text{Si } N_{diarioNuevaMS} < MinNreq \\ = p_{DailyBiomass} * (NGrowth - MinNreq) / (MaxNreq - MinNreq) & \text{Si } N_{diarioNuevaMS} \leq MaxNreq \\ & \text{y } N_{diarioNuevaMS} \geq MinNreq \end{array} \right.$$

La cantidad total de MS se actualiza diariamente, y es distribuida entre los diferentes órganos de la planta (hoja, tallo, raíz y fruto) durante el ciclo del cultivo.

2.5. Estimación del requerimiento o dosis de N

En el modelo INIA, la estimación de la dosis requerida de N (N_{dosis}) se basa en 1) la cantidad de N requerida (d_Var_Ndispo) (Ecuación 21) para llevar el contenido de N mineral lábil disponible (Nrl), acumulado en las diferentes profundidades desde 0 hasta 50 cm de profundidad ($Nrl50cms$) del perfil del suelo, hasta la cantidad de N que debería existir en el suelo para cubrir la tasa potencial de absorción diaria ($p_Ndisp_pDailyMS$) estimada como se indica en la Ecuación 22, y 2) un factor empírico ($d_RatN_Salida_Nrl50cms$), calculado como se indica en la Ecuación 23, que considera las salidas diarias de N por lixiviación e inmovilización y el N absorbido por el maíz ($d_NLix_Immb_NUP$) como una proporción del N lábil en el suelo $Nr150cms$ y que, considerando que el N aplicado como N fertilizante está sujeto con la misma intensidad a los diferentes procesos en el suelo (lixiviación, inmovilización, absorción) que afecta el N mineral del suelo ($Nr150cms$) permitirá corregir la cantidad o dosis de N.

El N potencial requerido diariamente en el suelo ($p_Ndisp_pDailyMS$), para cubrir la demanda de la materia seca potencial que se produciría, es estimada para el período desde 0 hasta 34 días según la Ecuación 22, donde $p_N_pDailyMS_NoLim$ es el N potencial requerido en la planta para producir la materia seca sin limitación del elemento. De manera práctica, la estimación de la cantidad de N a aplicar como fertilizante se debe estimar para el inicio del ciclo del cultivo, por ello se utiliza la relación entre N disponible en el suelo y la tasa de absorción por el cultivo obtenida para el periodo desde 0 hasta 34 días, aunque, en este modelo, la estimación de la dosis de N se realiza del promedio de los primeros diez días desde la siembra.

$$d_Var_Ndispo = p_Ndisp_pDailyMS - Nr150cms \quad (21)$$

$$p_Ndisp_pDailyMS = (51,896 * p_N_pDailyMS_NoLim) + 142,37 \quad (22)$$

$$d_RatN_Salida_Nr150cms = d_NLix_Immb_NUP / Nr150cms \quad (23)$$

Finalmente, la dosis de N (*Ndosis*) requerida para la condición específica suelo-cultivo-clima-manejo se estima según la Ecuación 24. En esta propuesta la dosis de N (*Ndosis*) a aplicar, como se muestra en la Ecuación 24 está conformada por dos componentes: la diferencia entre el N disponible en el suelo *Nr150cms* y el N que debería existir en el suelo para lograr la máxima absorción, se asume que la proporción de pérdida de N por lixiviación e inmovilización y consumo de N (*d_NLix_Immb_NUP*) por cada unidad del N que se aplicará como fertilizante, será similar a la *d_NLix_Immb_NUP* por cada unidad del N mineral disponible en el suelo (*Nr150cms*); así la cantidad de N que se perderá por lixiviación e inmovilización y absorbido por el cultivo, y que constituye el segundo componente de la Ecuación 24 (*d_Var_Ndispo * d_RatN_Salida_Nr150cms*), será la cantidad adicional de N que debe ser aplicado para garantizar que el N que queda en el suelo (después de las pérdidas o absorción por el cultivo) sea el suficiente para la absorción diaria de N requerido para la producción potencial de materia seca.

$$NDosis = d_Var_Ndispo + (d_Var_Ndispo * d_RatN_Salida_Nr150cms) \quad (24)$$

Debido a que el modelo de simulación INIA indicaría una dosis de N por cada día de la simulación, estimada como se ha indicado previamente, para los fines prácticos de recomendación de fertilizantes por el modelo se considerará el promedio de las dosis de N estimadas de los primeros 10 días después de la siembra.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Determinación de las dosis de N requeridas por el maíz, en condiciones variables de disponibilidad de N mineral inicial en el suelo, a nivel de campo.

La determinación de la dosis de N requerida por el maíz cultivado en un suelo Oxic Haplustalfs ubicado en la estación experimental de Yaritagua en la localidad de Yaritagua, municipio Peña, estado Yaracuy, se realizó en cada una de las parcelas principales, donde el primer año del mismo se creó un gradiente de N mineral mediante la aplicación de 0, 150, 300, y 450 kg N ha⁻¹, en un diseño en bloques al azar, descrito previamente. En cada uno de estos tratamientos (Parcela principal) se evaluó en un segundo año, la respuesta del maíz a la aplicación de 0, 40, 95, 120, 160 y 240 kg N ha⁻¹, con un diseño de parcelas divididas y se determinó la dosis máxima requerida mediante la primera derivada del modelo de regresión cuadrática (descrito en el Capítulo II).

En este estudio, además del análisis de respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N (desde 0 hasta 240 kg N ha⁻¹), se analizó la información correspondiente a las parcelas principales donde se aplicaron los tratamientos de N en el primer año del estudio, con los contenidos de N mineral ponderado entre 0 y 40 cm de profundidad de 17,75; 31,19; 34,21 y 34,64 mg N kg⁻¹ para cada uno de los tratamientos 0, 150, 300 y 450 kg N ha⁻¹, respectivamente. De esta manera, para cada grupo se obtuvo una función cuadrática, en la cual se relacionó la producción de grano con el incremento de la dosis de N entre 0 y 240 kg N ha⁻¹. Finalmente para cada uno de los grupos, mediante la derivada de la función cuadrática, se obtuvo la dosis de N requerida para la máxima producción o rendimiento.

2. Evaluación de la capacidad del modelo INIA para la estimación de dosis de N

2.1. Calibración y Validación del modelo INIA para la predicción del rendimiento del cultivo

La calibración del modelo INIA, paso previo y necesario para utilizar el modelo en la estimación de la dosis de N, y que consiste al proceso de ajuste del rendimiento simulado (S) al rendimiento observado (O) mediante el ajuste de algunos parámetros del modelo, se realizó en cada una de las 12 parcelas principales utilizando el contenido inicial de N mineral extraíble en KCl (2M), los contenidos de arena y la materia orgánica de las diferentes capas desde 0 hasta 40 cm de profundidad. Para la validación del modelo INIA en la predicción del rendimiento, la calibración del modelo INIA se realizó para cada una de las parcelas principales en el tratamiento 0 kg N ha⁻¹, mientras que para la validación, una vez calibrado el modelo se empleó los tratamientos parcelas principales empleando los tratamientos 40, 95, 120, 160 y 240 kg N ha⁻¹.

En el proceso de calibración, el ajuste del rendimiento simulado (S) al rendimiento observado (O) se realizó mediante la variación del parámetro que relaciona el agua del suelo requerida para la producción de una unidad de materia seca (gAgua g⁻¹ MS), los parámetros I_{max} y K_m que corresponden a la tasa máxima diaria de absorción de N (MaxN_{req}) y la concentración del mismo en el suelo a la cual ocurre ½ de I_{max} utilizadas en el modelo de absorción de N según la ecuación de Michael-Menten y el parámetro C_{Lim} que considera la concentración mínima de N en el suelo por debajo de la cual la absorción de N es reprimida. Se consideró que el modelo estaba calibrado para la localidad cuando los parámetros β₁ y β₀ del modelo de regresión simple que relacionan el rendimiento S y el rendimiento O son de manera simultánea estadísticamente similares a 1 y 0, respectivamente, de acuerdo con la prueba F desarrollada por Dent y Blackie (1979) descrita por Haefner (1996) y detallada en el Capítulo IV. Si el modelo tiene mérito, se fallará en refutar la hipótesis nula en la cual la pendiente es 1,0 y el intercepto es 0,0; es decir, pequeños valores de F significan que el modelo presenta buen ajuste.

Una vez calibrado el modelo, como se indicó previamente, la validación del modelo, que consiste en la comparación del rendimiento S contra el O, se realizó mediante una corrida del modelo para las dosis 45, 95, 120, 160 y 240 kg N ha⁻¹, en cada una de las parcelas principales.

En el Cuadro 15 y 16 se muestra la información de suelo y de cultivo para cada parcela principal utilizada para correr el modelo.

Con respecto a los parámetros de cultivo, la estimación del tiempo térmico desde germinación (TimeGerm) hasta madurez fisiológica (TimeMadFisio) se calculó mediante el método de sumatoria de las unidades de calor diaria expresado en tiempo térmico en grados días para un período específico como los grados acumulados sobre una temperatura umbral durante dicho período, según la ecuación 25:

$$\text{Tiempo térmico: } 0,5 (T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) - T_b \quad (25)$$

donde: T_{max} es la temperatura máxima; T_{min} corresponde a la temperatura mínima y T_b la temperatura base ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Derifux y Bonhomme, 1982).

La comparación entre los rendimientos S y O se realizó: 1) de manera gráfica, comparando el modelo de regresión lineal simple entre los valores observados y simulados contra la línea de regresión con pendiente 1 e intercepto 0, que sería la regresión perfecta en caso en que los valores simulados y observados fuesen similares, y 2) mediante la evaluación estadística del índice F (Dent y Blackie, 1979) como se indicó previamente en la calibración del modelo.

2.2 Estimación de dosis de N requeridas utilizando el modelo INIA

La estimación de la dosis de N, en cada una de las parcelas principales, se realizó considerando las condiciones de suelo de las parcelas donde no se aplicó N (0 kg N ha^{-1}). En este caso el modelo se calibro, de manera similar al indicado previamente, tomando para la misma el tratamiento 40 kg N ha^{-1} , y se simulo la dosis de N considerando la aplicación de 0 kg N ha^{-1}

Cuadro 15. Parámetros de suelos requeridos por el modelo INIA.

Parámetro / Variable	Unidades	Bloque I				Bloque II				Bloque III			
		0	150	300	400	0	150	300	400	0	150	300	400
kg N ha⁻¹													
Espesor capa 1	cm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Espesor capa 2	cm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Espesor capa 3	cm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Espesor capa 4	cm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Espesor capa 5	cm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Contenido de arena capa 1	%	55	55	57	59	55	53	57	55	53	55	47	51
Contenido de arena capa 2	%	47	55	55	53	53	55	51	55	53	59	43	53
Contenido de arena capa 3	%	49	49	51	51	51	49	49	55	49	51	45	43
Contenido de arena capa 4	%	49	49	51	51	51	49	49	55	49	51	45	43
Contenido de arena capa 5	%	49	49	51	51	51	49	49	55	49	51	45	43
Contenido humedad a CC capa 1	% (g/g)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Contenido humedad a CC capa 2	% (g/g)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Contenido humedad a CC capa 3	% (g/g)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Contenido humedad a CC capa 4	% (g/g)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Contenido humedad a CC capa 5	% (g/g)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Contenido humedad PMP capa 1	% (g/g)	6,01	6,01	6,01	6,01	6,30	6,30	6,30	6,30	7,10	7,10	7,10	7,10
Contenido humedad PMP capa 2	% (g/g)	8,20	8,20	8,20	8,20	7,80	7,80	7,80	7,80	7,30	7,30	7,30	7,30
Contenido humedad PMP capa 3	% (g/g)	8,40	8,40	8,40	8,40	9,20	9,20	9,20	9,20	8,80	8,80	8,80	8,80
Contenido humedad PMP capa 4	% (g/g)	8,40	8,40	8,40	8,40	9,20	9,20	9,20	9,20	8,80	8,80	8,80	8,80
Contenido humedad PMP capa 5	% (g/g)	8,40	8,40	8,40	8,40	9,20	9,20	9,20	9,20	8,80	8,80	8,80	8,80
Tasa de mineralización fracción lábil de N uránico del suelo	kg ha ⁻¹ d ⁻¹	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
Tasa de mineralización fracción más estable de N orgánico del suelo	kg ha ⁻¹ d ⁻¹	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
N mineral inicial capa 1	mg kg ⁻¹	19,4	13,8	50,4	47,2	33,3	16,,3	39,2	45,8	13,7	33,9	51,5	52,9
N mineral inicial capa 2	mg kg ⁻¹	14,2	20,2	10,1	35,5	16,8	42,6	38,4	28,1	21,4	20,7	43,6	33,0
N mineral inicial capa 3	mg kg ⁻¹	18,0	40,0	25,6	32,7	15,1	31,3	39,9	21,9	14,1	41,4	23,2	32,1
N mineral inicial capa 4	mg kg ⁻¹	18,0	40,0	25,6	32,7	15,1	31,3	39,9	21,9	14,1	41,4	23,2	32,1

Continuación ...

N mineral inicial capa 5	mg kg ⁻¹	18,0	40,0	25,6	32,7	15,1	31,3	39,9	21,9	14,1	41,4	23,2	32,1
Contenido humedad inicial capa 1	% (g g ⁻¹)	13,7	13,7	13,7	13,7	15,5	15,5	15,5	15,5	16,7	16,7	16,7	16,7
Contenido humedad inicial capa 2	% (g g ⁻¹)	13,5	13,5	13,5	13,5	15,3	15,3	15,3	15,3	16,7	16,7	16,7	16,7
Contenido humedad inicial capa 3	% (g g ⁻¹)	13,5	13,5	13,5	13,5	15,3	15,3	15,3	15,3	16,7	16,7	16,7	16,7
Contenido humedad inicial capa 4	% (g g ⁻¹)	13,5	13,5	13,5	13,5	15,3	15,3	15,3	15,3	16,7	16,7	16,7	16,7
Contenido humedad inicial capa5	% (g g ⁻¹)	13,5	13,5	13,5	13,5	15,3	15,3	15,3	15,3	16,7	16,7	16,7	16,7
Tasa máxima diaria de absorción N (Imax)		0,350	0,470	0,435	0,386	0,530	0,225	0,422	0,283	0,482	0,400	0,288	0,275
½ de Imax (Km)		0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Concentración mínima N suelo (Clim)		0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,134	0,134	0,134	0,134
Densidad aparente capa 1	Mg m ⁻³	1,40	1,40	1,40	1,40	1,62	1,62	1,62	1,62	1,70	1,70	1,70	1,70
Densidad aparente capa 2	Mg m ⁻³	1,73	1,73	1,73	1,73	1,68	1,68	1,68	1,68	1,69	1,69	1,69	1,69
Densidad aparente capa 3	Mg m ⁻³	1,55	1,55	1,55	1,55	1,50	1,50	1,50	1,50	1,63	1,63	1,63	1,63
Densidad aparente capa 4	Mg m ⁻³	1,55	1,55	1,55	1,55	1,50	1,50	1,50	1,50	1,63	1,63	1,63	1,63
Densidad aparente capa 5	Mg m ⁻³	1,55	1,55	1,55	1,55	1,50	1,50	1,50	1,50	1,63	1,63	1,63	1,63
Tasa infiltración saturada capa 1	mm h ⁻¹	2,63	2,63	2,63	2,63	3,20	3,20	3,20	3,20	0,80	0,80	0,80	0,80
Tasa infiltración saturada capa 2	mm h ⁻¹	1,77	1,77	1,77	1,77	2,10	2,10	2,10	2,10	2,20	2,20	2,20	2,20
Tasa infiltración saturada capa 3	mm h ⁻¹	1,20	1,20	1,20	1,20	1,30	1,30	1,30	1,30	1,33	1,33	1,33	1,33
Tasa infiltración saturada capa 4	mm h ⁻¹	1,20	1,20	1,20	1,20	1,30	1,30	1,30	1,30	1,33	1,33	1,33	1,33
Tasa infiltración saturada capa 5	mm h ⁻¹	1,20	1,20	1,20	1,20	1,30	1,30	1,30	1,30	1,33	1,33	1,33	1,33
Contenido de Materia orgánica capa 1	%	1,1	0,9	1,3	1,3	1,3	1,1	1,3	1,4	1,3	1,6	1,5	1,3
Contenido de Materia orgánica capa 2	%	0,8	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9	0,8	0,9	1,2	1,0	1,4	0,9
Contenido de Materia orgánica capa 3	%	0,6	0,5	0,7	0,8	0,7	0,9	0,6	0,8	0,8	1,2	0,9	0,9
Contenido de Materia orgánica capa 4	%	0,6	0,5	0,7	0,8	0,7	0,9	0,6	0,8	0,8	1,2	0,9	0,9
Contenido de Materia orgánica capa 5	%	0,6	0,5	0,7	0,8	0,7	0,9	0,6	0,8	0,8	1,2	0,9	0,9

CC: Capacidad de Campo, PMP: Punto de marchitez permanente: tomadas de las curvas de retención de humedad 1/3 y 15 bars respectivamente

Cuadro 16. Parámetros de cultivo en la Localidad de Yaritagua del valle medio del Río Yaracuy.

Parámetro cultivo	Unidades	Valor
TimeGerm: Tiempo acumulado desde la siembra hasta 50% germinación	Tiempo térmico (°C)	35
TimeMaxMSHT: Tiempo acumulado desde la siembra hasta máxima acumulación de materia seca en hoja y tallo	Tiempo térmico (°C)	916
TimeInfMas: Tiempo acumulado desde la siembra a la aparición de la inflorescencia masculina	Tiempo térmico (°C)	916
TimeInfFem: tiempo acumulado desde la siembra a la aparición de la inflorescencia femenina.	Tiempo térmico (°C)	1009
TimeMadFisio: Tiempo acumulado desde la siembra a madurez fisiológica	Tiempo térmico (°C)	1562
PropMant 1: Proporción de materia seca utilizada diariamente para mantenimiento	%	1
RUE: Eficiencia de utilización de la radiación solar		2,5
gAgua gMS: Factor de utilización de agua por cada unidad de materia seca producida	g H ₂ O /gMS	200
MinHumLim: Contenido mínimo de humedad limitante	%	70
OptIAF: Índice de área foliar óptimo para fotosíntesis	m ² área foliar / m ² suelo	5

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Respuesta del maíz a la aplicación de N y determinación de dosis de N

Las dosis de N estimadas en función de la relación de la respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N al máximo rendimiento en condiciones variable de N mineral inicial (Figura 27, del Capítulo IV), mostraron una tendencia creciente en condiciones donde no se aplicó fertilizante en el ciclo anterior. Las dosis obtenidas de campo fueron utilizadas en el estudio y ejecución del modelo INIA.

En la Figura 36 se muestra la relación entre el rendimiento del maíz y la aplicación de dosis crecientes de N en condición de contenidos variables de Nmin inicial agrupadas según los tratamientos de N aplicados en la creación del gradiente en el primer año del estudio. Las dosis máximas obtenidas de las funciones de regresión fueron de 158,0; 134,0; 116,0 y 46,0 kg N ha⁻¹ para los tratamientos 0, 150, 300 y 450 kg N ha⁻¹, respectivamente, las cuales decrecieron con el incremento de la dosis de N aplicada. En las condiciones donde el contenido de N mineral inicial a los 40 cm de profundidad fue mayor (34,21 mg N kg⁻¹) el rendimiento en granos fue superior a 3000 kg ha⁻¹ (Figura 36C), con respecto a las parcelas que no recibieron N y que presentaron contenidos menores de N mineral inicial (17,75 mg kg⁻¹) en el suelo (Figura 36A). Lo antes indicado concuerda con observaciones realizadas en el presente estudio (Capítulo II), según las cuales, la respuesta a la aplicación de N estuvo asociada a la disponibilidad del N en el suelo. Este resultado demuestra que la capacidad de rendimiento del suelo, varía en función del contenido inicial de N.

2. Calibración y validación del modelo INIA

El modelo se calibró mediante la variación de los parámetros I_{max}, K_m, Clim, y del parámetro g_{Agua}/g_{MS} hasta que la salida del modelo (rendimiento de la producción de grano) se asemejara razonablemente a los rendimientos observados. En el Cuadro 15 se indican los diferentes parámetros utilizados en el modelo y sus valores. En este caso, el ajuste de los valores simulados a los observados se logró mediante variación de los parámetros seleccionados y utilizando la dosis de 0 Kg N ha⁻¹.

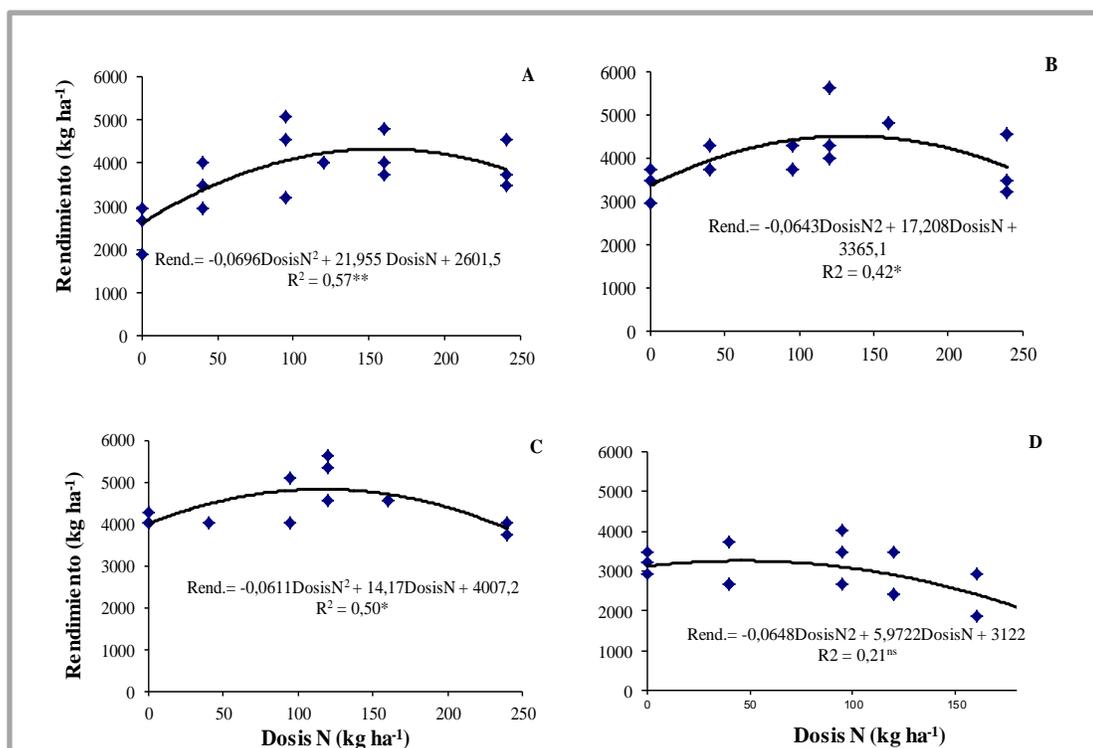


Figura 36. Respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N en condición de contenidos variables de N mineral inicial ponderado entre 0 y 40 cm de profundidad: A) 17,75 mg N kg⁻¹, B) 31,19 mg N kg⁻¹, C) 34,21 mg N kg⁻¹ y D) 34,64 mg N kg⁻¹.

En la Figura 37 se ilustra la relación entre el rendimiento observado y simulado para la dosis 0 Kg N ha⁻¹ por cada parcelas principales utilizadas para la calibración del modelo. Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,72 altamente significativo ($p < 0,0005$); la condición simultánea de pendiente (B1) igual a 1 y ordenada al origen (B0) igual a cero, se logró en la línea de regresión entre los valores observados y estimados como lo indica el estadístico F y estuvo próximo a la línea 1:1 que refleja una relación perfecta entre rendimiento observado y simulado.

En la validación del modelo (Figura 38) se muestra la relación entre rendimiento observado y simulado para los tratamientos fertilizados desde 40 hasta 240 kg ha⁻¹ todos de manera conjunta; se obtuvo un coeficiente de determinación ($R^2 = 0,36$; $P < 0,0001$).

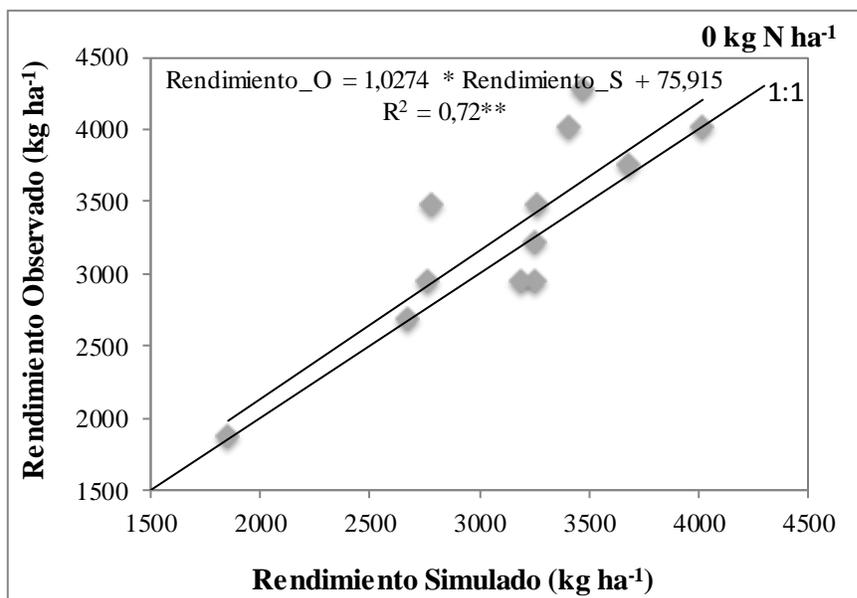


Figura 37. Relación entre rendimiento observado y simulado en las parcelas sin aplicación de N utilizadas para calibración del modelo.

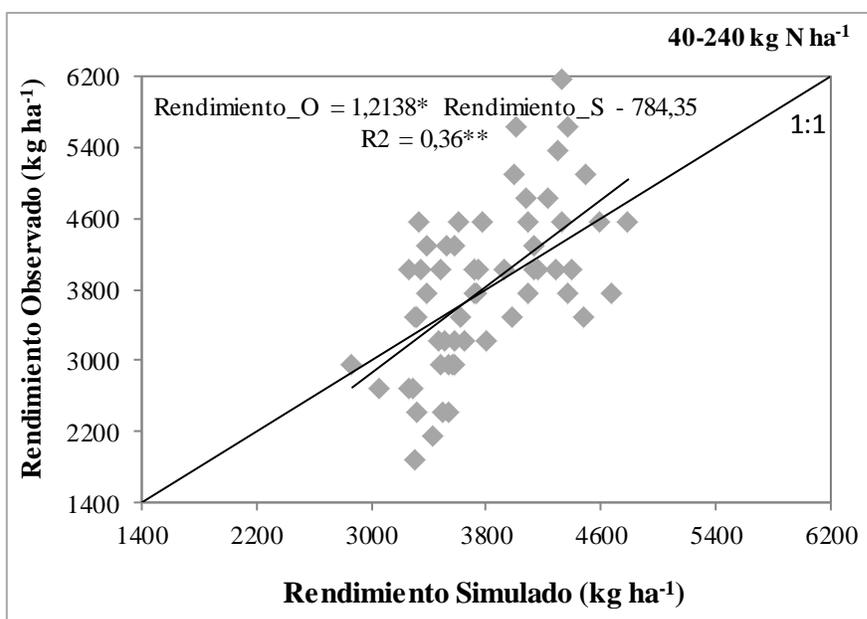


Figura 38. Relación entre el rendimiento observado y simulado en los tratamientos fertilizados desde 40 hasta 240 kg ha⁻¹.

De manera similar el estadístico F no fue superior al valor tabulado indicando que ambos parámetros B1 y B0 son estadísticamente similares a 1 y 0 respectivamente, lo cual refleja la bondad del modelo en la predicción del rendimiento. En ambos casos, la calibración y validación (Figuras 37 y 38), del análisis de la relación entre el rendimiento observado y simulado, mostró que la línea 1:1 reflejó una relación perfecta entre los valores observados y simulados.

3. Estimación de Dosis de N mediante el modelo INIA

En la Figura 39 se muestra la relación entre el rendimiento observado y simulado cuando el modelo se calibró mediante el uso del tratamiento 40 kg N ha⁻¹. En este caso, una vez realizada la calibración, se utilizó las parcelas principales donde no se aplicó N (0 kg N ha⁻¹) para la estimación de la dosis de N. Se observa que el coeficiente de determinación del modelo de regresión simple fue 0,997, mientras que la pendiente fue 0,995. El estadístico F no fue superior al valor crítico lo que indica que β_0 y β_1 son estimadores de 0 y 1 de manera conjunta, e indica que el modelo está calibrado.

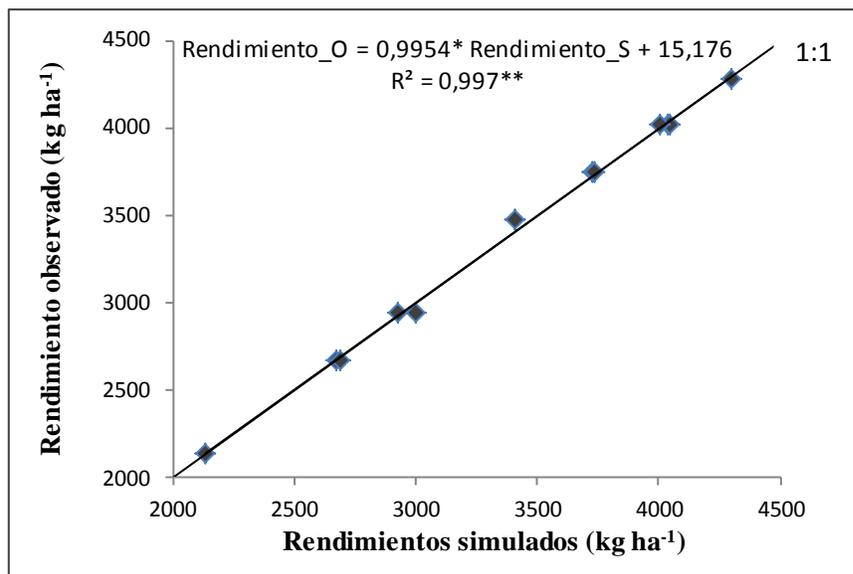


Figura 39. Relación entre rendimiento observado y simulado en la calibración del modelo utilizando la dosis de 40 kg N ha⁻¹.

En la Figura 40 se muestra la relación entre las dosis de N estimadas por el modelo INIA y las dosis de N obtenida del estudio de respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de dosis crecientes de N en cada parcela principal (Dosis Observadas). La dosis de N máxima se obtuvo mediante la primera derivada del modelo de regresión cuadrática en cada una de las parcelas donde la respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N mostró tendencia cuadrática, aunque en algunos casos estas no fuesen significativas como se mostraron en la Figura 27, Capítulo IV.

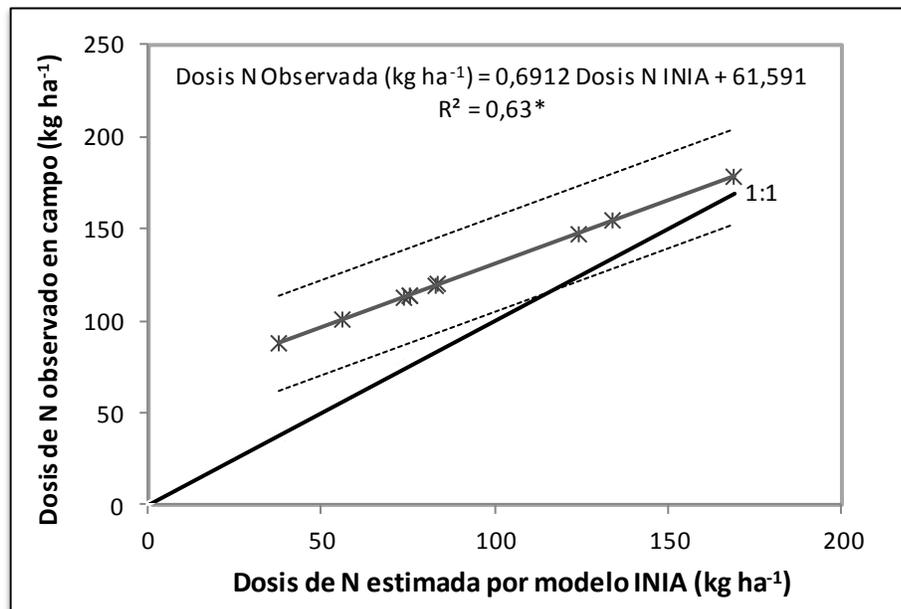


Figura 40. Relación entre la dosis de N simulada por el modelo INIA y la dosis de N máxima obtenida de la respuesta del maíz a la aplicación de dosis variables del elemento.

La dosis generada con el modelo INIA se obtuvo para cada parcela principal, en la cual se refleja variación de los contenidos de N mineral, debido a la diferencia en las dosis de N aplicadas para crear el gradiente de N, así como a la variación espacial de los contenidos de materia orgánica, valores de infiltración, y textura en las diferentes capas del perfil del suelo (Cuadro 15).

Los resultados obtenidos mostraron una relación lineal significativa ($R^2 = 0,63$; $p < 0,005$) entre la dosis de N simulada y la dosis de N. Sin embargo, se observó que la dosis simulada por el modelo INIA es consistentemente inferior a la dosis de N máxima relacionada con el rendimiento máximo; el modelo parece subestimar la dosis de N, aunque la significativa regresión lineal entre las dosis de N simuladas y observadas permitirá estimar o ajustar las dosis a aplicar a partir de las dosis simuladas por el modelo. Más aún, se observa que la línea 1:1 en parte cae dentro del límite de confianza del modelo de regresión, lo cual sugiere que parte de las dosis estimadas por el modelo INIA están próximas o son similares a las observadas.

Por otra parte, la evaluación conjunta de los coeficientes β_1 y β_0 del modelo de regresión entre las dosis de N simuladas por el modelo INIA y las dosis de N observadas, mediante el índice F con un valor superior al nivel crítico de F (Tabulado), no permitió refutar la hipótesis nula que la pendiente es 1 que y el intercepto es 0. Lo antes indicado muestra la bondad del modelo para predecir dosis de N. Sin embargo, aunque el modelo predice dosis de N que están en el mismo orden de magnitud que las dosis obtenidas en campo, es necesario un continuo ajuste del modelo para mejorar la predicción de la dosis de N.

En la Figura 41 se muestra la relación entre el contenido inicial ponderado de N mineral a diferentes profundidades del suelo con: (1) las dosis de N estimadas por el modelo INIA, y (2) las dosis obtenidas de los estudios de respuesta del maíz a la aplicación de dosis crecientes de N. Se aprecia que el coeficiente de determinación del modelo de regresión que relaciona el N mineral del suelo y la dosis de N estimada por el modelo INIA se incrementó notablemente cuando se adicionó el N mineral más profundo; los coeficientes de regresión fueron 0,31 ($P > 0,05$); 0,46 ($P < 0,05$) y 0,76 ($P < 0,01$) a los 0-10, 0-20 y 0-40 cm de profundidad, respectivamente.

Por otra parte, los coeficientes de determinación de los modelos de regresión entre las dosis obtenidas del estudio de respuesta y el contenido de Nmin fueron 0,54; 0,76 y 0,73 ($P < 0,01$) para las profundidades de 0-10, 0-20 y 0-40 cm, respectivamente. Esto sugiere que el contenido promedio de Nmin desde 0-20 hasta 0-40 cm de profundidad está significativamente asociado con las dosis de N

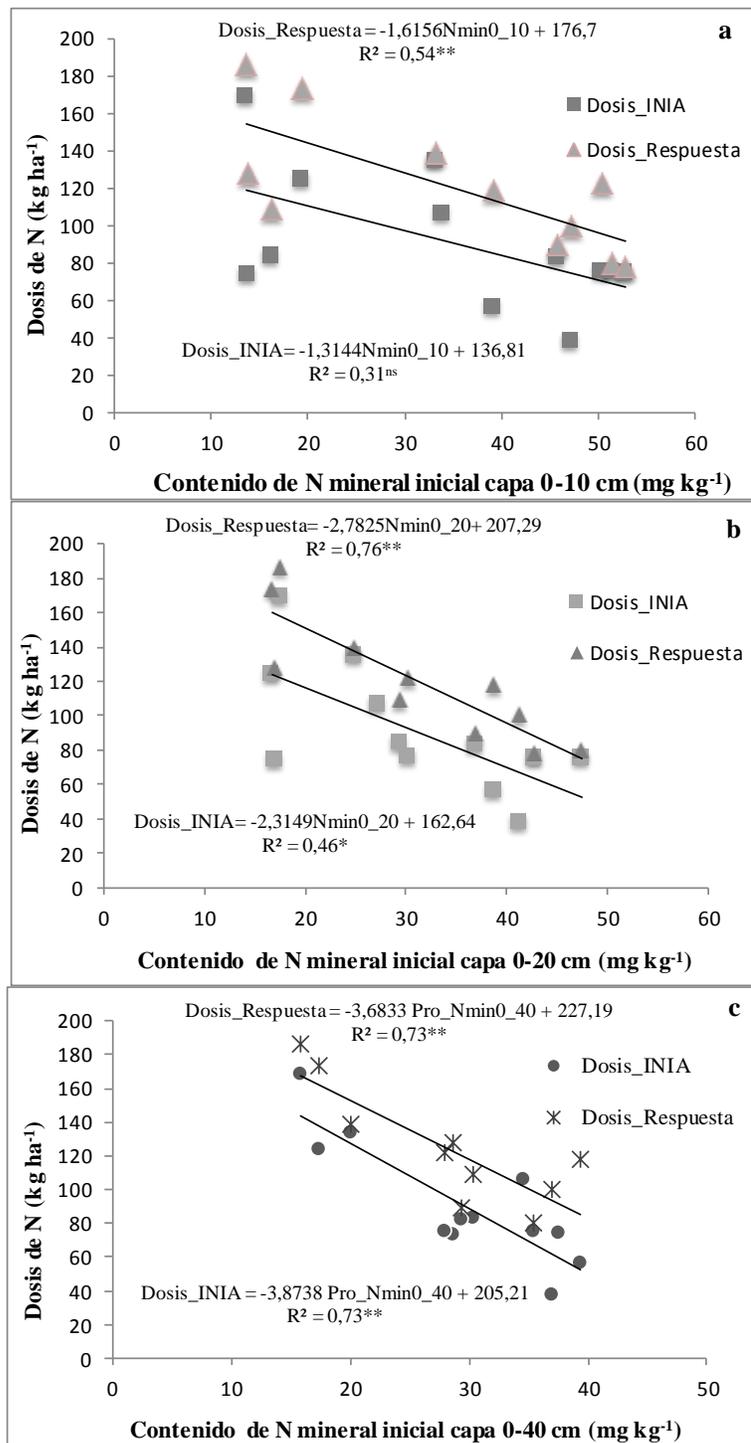


Figura 41. Relación entre el contenido promedio ponderado de N mineral inicial en la capa 0-10 (a), 0-20 (b) y 0-40 cm (c) con la dosis de N estimada por el modelo INIA (Dosis-INIA) y con la dosis de N estimada (Dosis-respuesta) de los estudios de respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N.

observadas y con las simuladas con el modelo INIA y muestra que mayores contenidos de Nmin en el suelo se relacionan inversamente con menores dosis de N a recomendar.

En la Figura 42 se muestra la relación entre la dosis de N simulada promedio por el modelo INIA y la dosis promedio de N observada para cada una de las condiciones de N mineral inicial o residual creadas mediante la aplicación de 0, 150, 300 y 450 kg N ha⁻¹ en el año previo.

Mediante el uso del modelo INIA se logró estimar dosis de N que están en el mismo orden de magnitud a las dosis de N observadas a nivel de campo. Aunque en algunos casos se detectaron diferencias significativas entre las dosis de N observadas y simuladas. Para la condición donde no se aplicó N y se aplicó 300 kg N ha⁻¹, las dosis estimadas por el modelo INIA fueron estadísticamente iguales (P<0,05) a las dosis obtenidas de campo, lo que muestra la bondad del modelo para predecir dosis de N en condiciones variables de N en el suelo.

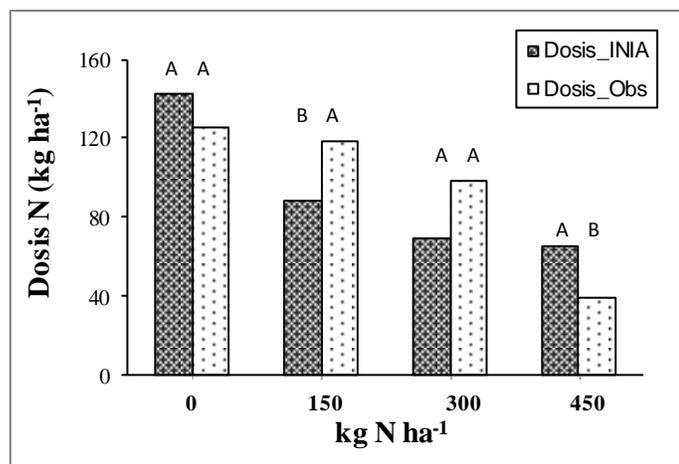


Figura 42. Dosis de N simuladas por el modelo INIA y dosis de N observadas.

V. CONCLUSIONES

En este estudio fue posible calibrar y validar el modelo INIA para la estimación de la producción de grano en condiciones variables de disponibilidad de N en el suelo estudiado.

- Las dosis de N observadas y simuladas están relacionadas con la disponibilidad de N mineral inicial (al momento de la siembra). Las mismas decrecen con el incremento del promedio ponderado de N mineral en el suelo, lo que denota la sensibilidad del modelo para diferenciar dosis de N según la disponibilidad de N en el suelo.
- El modelo INIA logró predecir dosis de N específicas según la disponibilidad del N en el suelo, y para las condiciones variables de materia orgánica, contenido de arena, densidad aparente y tasa de infiltración.
- Las diferencias entre las dosis observadas y simuladas podrían estar afectadas por las variables de suelo, las cuales presentan variabilidad espacial aún dentro de las parcelas principales, debido al origen aluvial de estos suelos.

APÉNDICE

V.1. Radiación diaria y mensual del año 2010, registrada en la Estación climatológica del INIA Yaritagua.



Estación: YARITAGUA

Radiación

Latitud: 10°02 N **Altitud:** 308 MSNM
Longitud: 69°05W **Año:** 2010

Mes:	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Día			Cal cm ⁻¹		
01	143	259	361	411	310
02	356	303	282	310	317
03	374	368	299	237	257
04	418	292	253	350	239
05	207	338	382	331	262
06	87	193	274	342	354
07	342	294	310	297	354
08	382	97	336	230	354
09	340	329	292	251	354
10	354	294	329	205	274
11	276	260	234	299	381
12	358	285	276	317	391
13	269	345	301	354	340
14	405	310	276	246	319
15	228	351	306	377	326
16	363	198	322	346	349
17	172	228	342	241	336
18	319	329	296	329	308
19	308	407	379	248	389
20	236	400	366	388	402
21	212	347	320	305	299
22	313	374	269	340	340
23	287	372	297	225	319
24	342	398	280	168	308
25	349	267	262	292	343
26	278	308	234	391	370
27	352	239	310	230	342
28	197	381	312	136	359
29	274	301	342	352	384
30	308	345	336	244	351
31		398	320		354
MEDIA	294,9	310	306	293	335

CONCLUSIONES GENERALES

Del análisis de los resultados de la evaluación de técnicas de diagnóstico para la recomendación de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz, se concluye:

1. La determinación de la dosis de N a recomendar basada en la valoración de los contenidos de N-NO_3^- y N mineral como índices de disponibilidad del elemento, representa una prueba de intensidad que puede ser usada antes de la siembra y en la fase de cinco y seis hojas del maíz, se debe considerar que es afectada por factores ambientales y en consecuencia debe ser evaluada en cada sitio específico.
2. El uso del clorofilómetro como instrumento indicativo de la necesidad de fertilización nitrogenada proporciona una medida indirecta del estado nutricional nitrogenado del cultivo, en forma rápida y no destructiva, que en conjunto con índices de disponibilidad de N en el suelo puede ser usado para determinar la dosis de N a recomendar.
3. El programa computarizado NuMaSS predijo dosis en forma rápida y a bajo costo, pero requiere del conocimiento de la zona por parte del usuario, para generar mayor precisión en la estimación,
4. El modelo INIA como mecanismo integrador, que evalúa diferentes escenarios, predijo dosis confiables para fertilización nitrogenada en las condiciones evaluadas, sin embargo requiere abundante información, entrenamiento y formación por parte del usuario.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, X. 1996. Evaluación de cuatro leguminosas como barbecho mejorado durante dos épocas del año para ser usadas como cultivos de cobertura. *Venesuelos* 8 (1-2): 8-13.
- Álvarez, L. 2002. Optimización de la fertilización nitrogenada y del manejo del agua de riego en la producción de arroz mediante el modelo de simulación CERESrice. Tesis. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 243 pp.
- Álvarez, R., F.H. Gutiérrez y G. Rubio. 2012. Recomendación de fertilización. En: Fertilización de Cultivos y pasturas: Diagnóstico y recomendación en la Región pampeana. Eds. Álvarez, R. P. Prystupa, M.B. Rodríguez y C.R. Álvarez. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 130-144 pp.
- Allison, L.E. 1975. Organic carbon. C.A. Black (Ed). *Methods of soil analysis*. Parte 2. Agronomy 9. Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin. pp 1367-1378.
- Andrade, O., I. Arrieche y M. León. 2012. Diagnóstico de la fertilidad de suelos agrícolas en el estado Yaracuy basado en análisis de Laboratorio. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. 16 al 20 de abril, Mar del Plata, Argentina.
- Argenta, G, P. Ferreira, C. Bortolini, E. Forsthofer y M. Strieder. 2001. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. *R. Bras. Fisiol. Veg.* 13 (2):158-167.
- Argenta, G., P. Ferreira, J. Mielniczuk y C. Bortolini. 2002. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. *Pesq. Agropec. Bras.* 37(4): 519-527.
- Argenta, G., P. Ferreira y L. Sangoi. 2004. Leaf relative chlorophyll content as an indicator parameter to predict nitrogen fertilization in maize. *Ciência Rural.* 34(5): 1379-1387.
- Arrieche, I. 2008. Efecto de la fertilización orgánica y química en suelos degradados cultivados con maíz (*Zea mays* L.) en el estado Yaracuy, Venezuela. Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias Agroforestales. Universidad de Valladolid. pp 175.
- Ayarza, M., J. Smyth, M. Trejo, E. García y E. Navarro. 2007. Sistema experto de manejo de nutrientes (NuMaSS): Herramienta de decisión para mejorar la eficiencia de la fertilización nitrogenada en el cultivo del maíz en Honduras y Nicaragua. XVII Latin American Congress of Soil Science, 17-21 September. Leon, Mexico.

- Barbieri, P., H. Echeverría y H. Rozas. 2009. Nitratos en el suelo a la siembra o al mocallaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada em trigo en el sudeste
- Barbosa, M., T. Cobucci, N. Fageria y P. Neves. 2008. Determinação da necessidade de adubação nitrogenada de cobertura no feijoeiro irrigado com auxílio do clorofilômetro portátil. *Ciência Rural*. 38 (7): 1843-1848.
- Bataglia, O. y A. Dechen. 1986. Critérios alternativos para diagnose foliar. In: Simpósio avançado de química e fertilidade do solo. Anais, FUNDAÇÃO CARGILL. 179p.
- Beg, D. M. 2000. Fertilización del cultivo maíz. FONAIAP Divulga 65: 1-4.
- Bianchini, A., M.E. Magnelli, D Canova, S. Lorenzatti, D. Peruzzi, J. Rabasa, A. Sylvestre Begnis y F. García. 2004. Diagnóstico de fertilización nitrogenada para maíz en siembra directa.
<http://www.fertilizando.com/articulos/Diagnostico-Fertilizacion-Nitrogenada-Maiz-Siembra-Directa.asp>. [Revisado el 02/02/2013].
- Binford, G.D., A.M. Blackmer y M.E. Cerrato. 1992a. Nitrogen concentration of young corn plants as na indicador of nitrogen availability. *Agron. J.* 84: 219-223.
- Binford, G.D., A.M. Blackmer y M.E. Cerrato. 1992b. Relationships between corn yields and soil nitrate in lare spring. *Agron. J.* 84: 53-59.
- Black, C.A. (Ed). 1975. Methods of soil analysis. Parte 1. *Agronomy 9*. Am. Soc. Agron. Madison. Wisconsin.
- Bono, A. y R. Álvarez. 2007. Estimación de nitratos en profundidad en suelos de la región semiárida y subhúmeda Pampeana. *Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI). Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 33: 25-26. [on line]: [http://www.inpofos.org/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex/4D7666F1233685CD0325728E00677D0A!opendocument](http://www.inpofos.org/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex/4D7666F1233685CD0325728E00677D0A!opendocument) [Consultado 09/09/2007].
- Bowen, W., Baigorrea, G., Jaramillo, R., Sarmiento, L. 2001. La simulación del crecimiento de papa en los Andes. *Memorias del IV Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable en los Andes: La estrategia para el siglo XXI*. Edición en CD-ROM.
- Bradbury, N.J., A.P. Whitmore, P.B. Hart y D. S. Jenkinson. 1993. Modelling the fate of nitrogen in crop and soil in the years following application of ¹⁵N-labelled fertilizer to winter wheat. *J. Agricultural Science, Cambridge*. 121: 363-379.
- Bregliani, M.M., E.J.M. Temminghoff, W.H. van Riemsdijk y E.S. Haggi. 2006. Nitrogen fractions in arable soils in relation to nitrogen mineralization and plant uptake. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 37: 1571-1586.

- Brito, G., J., I. López R., R. Pérez R. 1990. Manual de métodos y procedimientos de referencia (Análisis de suelo para diagnóstico de fertilidad). 1^{era} versión. INIA. 164p.
- Bundy, L. y E. Malone. 1988. Effect of residual profile nitrate on corn response to applied nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52 (1): 1377-1382.
- Busto, M. 2005. Inteligencia artificial en el sector Agropecuario. Seminario de Investigación I. Maestría en Ingeniería de Sistema y Computación. Universidad nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 8 p.
- Cabrera-Bisbal, E. 2003. Las técnicas isotópicas en la dinámica de nitrógeno en el continuo suelo-planta de agroecosistemas en Venezuela. 11(1-2): 30-38.
- Carvalho, M., E. Furlani, O. Arf, M. Sá, H. Paulino y S. Buzetti. 2003. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio e teores foliares deste nutriente e de clorofila em feijoeiro. *R. Bras. Ci. Solo.* 27: 445-450.
- Casanova, E. 2000. La fertilización y nutrición mineral del maíz en Venezuela. En: Fontana, H. y C. González (Eds). *El maíz en Venezuela*. Fundación Polar. Caracas, Venezuela. P 275-294.
- Casanova, E. 2005. Introducción a la Ciencia del Suelo. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. UCV. p. 454.
- Casanova, E., J. Comerma y J. G. Hernández. 1999. Detección de demandas tecnológicas en manejo de suelos derivados del servicio de asistencia técnica integral de Palmaven S.A. Memorias del XV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. 30 noviembre a 04 diciembre. Lara, Venezuela. 237-240 p.
- Castillo, J. L. Ribón, I. Barreiro, H. Pérez y J. Domínguez. 2011. Producción de fertilizantes sustentables hidrosolubles FHS y de liberación controlada FLC. *Virtualpro.* 109: 1-21.
- Comerma, G. y F. Ovalles. 1984. Informe mimeografiado incluido en el material de la Cátedra de Conservación de Suelos y Aguas del Postgrado en Ciencia del Suelo de la Facultad de Agronomía. UCV - Maracay.
- Corona, T, G. Almaguer y R. Maldonado. 2000. Sistema Computarizado Experto en diagnóstico nutrimental en naranjo. *Terra* 18 (2): 173-178.
- Corton, T., T. George, R. Escabarte, J. Lasquite, J. Quiton y M. Casimero. 2003. On-Farm Testing of NuMaSS in the Philippines. Chapter 4. In: Struif, T. y M. Wopereis (Eds). *Decision Support Tools for Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa a Practical Guide*. IFDC y CTA, USA. pp 54-67. [Online]: <http://www.cababstractsplus.org/abstracts/Abstract.aspx?AcNo=20033160476>. [Consulta 25/04/2013].

- Costa, C., L. Dwyer, P. Dutilleu, D. Stewart, B. MA y D. Smith. 2001. Interrelationships of applied nitrogen, SPAD, and yield of leafy and non-leafy maize genotypes. *J. Plant Nutrition*. 24: 1173-1194.
- Cruz, J., C. Pelacani y W. Araújo. 2006. Efecto do nitrato e amônio sobre o crescimento e eficiência de utilização do nitrogênio em mandioca. *Bragantia* 63(3):467-475.
- Cipriani, A., A. El Kantar, L. Lira y Y. Sánchez. 2008. Caracterización socioeconómica del sector agrícola del estado Yaracuy. INIA. Maracay, Venezuela. Serie B. N°17. 64p.
- D'Andréa, A., M. Silva, N. CURI y L. Guilherme. 2004. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.* 39(2):179-186.
- Da Ros, C., R. Salet, R. Porn y J. Corrêa M. 2003. Disponibilidade de nitrogênio e produtividade de milho e trigo com diferentes métodos de adubação nitrogenada no sistema plantio direto. *Ciência Rural*. 33(5):799-804.
- Delgado, R. 2001. Respuesta del maíz a la aplicación de nitrógeno y su relación con la disponibilidad del elemento en dos suelos de Venezuela: Producción de materia seca y grano. *Agronomía Trop.* 51:387-403.
- Delgado, R. 2002a. Relación entre la respuesta del cultivo maíz a la aplicación de N y la disponibilidad del elemento en el suelo. *Agronomía Trop.* 52(2): 209-222.
- Delgado, R. 2002b. Evaluación del crecimiento del maíz y absorción de nitrógeno bajo diversas condiciones de disponibilidad del elemento en un Molisol de Venezuela. *Agronomía Tropical*. 52(1):5-22.
- Delgado R. 2003. Soil-plant dynamics related to N uptake and soil N availability. Ph.D. diss. Colorado State University. Fort Collins, Colorado. 150 p.
- Delgado, R. 2010. Simulación de modelos para la dinámica del agua en el suelo y su disponibilidad para los cultivos. *INIA Hoy* 7:297-304.
- Delgado, R. y E. Cabrera de Bisbal. 1998. Evaluación de la capacidad de suministro de nitrógeno en diferentes suelos de Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 15:401-413.
- Delgado, R., y M. Núñez. 2005. Modelo de simulación para la predicción y evaluación de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. XVII Congreso venezolano de la ciencia del suelo. 17 al 20 de Mayo, 2005. Maracay, Edo. Aragua. Venezuela.
- Delgado, R. y A. Salas. 2006. Consideraciones para el desarrollo de un sistema integral de valuación y manejo de la fertilidad del suelo y aplicación de

- fertilizantes para una agricultura sustentable en Venezuela. *Agronomía Trop.* 56 (3): 289-323
- Delgado, R., M. Núñez y L. Velásquez. 2004. Acumulación de materia seca, absorción de nitrógeno, fósforo y potasio por el maíz en diferentes condiciones de manejo de la fertilización nitrogenada. *Agronomía. Trop.* 54(4):371-389.
- Delgado, R., L. Castro, E. Cabrera de Bisbal, M. Mújica, S. Caniche, L. Navarro e I. Noguera. 2008. Relación entre las propiedades físicas del suelo y algunas características del sistema radical del maíz, cultivado en un suelo Fluventic haplustoll de textura franco-arenosa de Maracay, Venezuela. *Agronomía Trop.* 58(3): 245-255.
- Dobermann, A., C. Witt, S. Abdulrachman, H. Gines, R. Nagarajan, T. Son, P. Tan, G. Wang, N. Chien, V. Thoa, C. Phung, P. Stalin, P. Muthukrishnan, V. Ravi, M. Babu, G. Simbahan, M. Adviento, V. Bartolome. 2003. Estimating indigenous nutrient supplies for site-specific nutrient management in irrigated rice. *Agron. J.* 95: 924–935.
- Dresler, S., W. Bednarek y P. Tkaczyk. 2011. Effects of Soil Properties and Nitrogen Fertilization on distribution of NO₃-N in Soils of Eastern Poland. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 42:2100–2111.
- Escalona, A., M. Santana, I. Acevedo, V. Rodríguez y L. Merú. 2009. Efecto de las fuentes nitrogenadas sobre el contenido de nitratos y lecturas “SPAD” en el cultivo de lechuga. *Agronomía Trop.* 59(1): 99-105.
- Etchevers, J. 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra* 17(3): 209-219.
- Fancelli, A. 1986. *Plantas Alimmentícias: guia para estudos e discussão.* CALQ, Piracicaba. 131p.
- Faust H., J.A. Sebastianelli y H. Axmann. 1987. Manual de laboratorio. Métodos para el análisis de ¹⁵N. In. Curso interregional de entrenamiento sobre el uso de ¹⁵N en ciencias de suelos, nutrición vegetal y biotecnología agrícola. Academia de Ciencias de la RDA. Leipzig, DDR. p.122.
- Ferguson, R., G. Hergert, J. Schepers, C. Gotway, J. Cahoon, y T. Peterson. 2002. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 544-553.
- Ferrari, M., L. Rivoltella y J. Casado. 2012. Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización nitrogenada en sorgo granífero. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16 al 20 de abril. Mar de Plata, Argentina.

- Ferrer, F., J. Villar y C. Stockle. 2000. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 15(3): 237-251.
- Ferrer, F., J. Villar, C. Stockle, P. Villar, M. Aran. 2003. Use of a pre-sidedress soil nitrate test (PSNT) to determine nitrogen fertilizer requirements for irrigated corn. *Agronomie.* 23: 561-570.
- Fontes, P. y C. Araujo de. 2007. Adubação nitrogenada de hortaliças. Princípios e práticas com o tomateiro. Ed. Universidade Federal de Viçosa, Brasil. Pp. 148.
- Fox, R., G. Roth, K. Iversen y W. Piekielek. 1989. Soil and tissue nitrate test compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.* 81:971-974.
- García, F. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI). Programa Latinoamericano Cono Sur Fertilización de cultivos y forrajes. [online]: [http://www.inpofos.org/ppiweb/ltams.nsf/\\$webindex/article=1C99BAD703257040004B8AE63BC3A0C3](http://www.inpofos.org/ppiweb/ltams.nsf/$webindex/article=1C99BAD703257040004B8AE63BC3A0C3). [Consulta 25/04/2007].
- García, F. y I. Daverede. 2006. Diagnóstico para recomendación de fertilización nitrogenada en cultivos de interés agronómico. Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI). Programa Latinoamericano Cono Sur. [online]: [http://www.inpofos.org/ppiweb/ltamn.nsf/\\$webindex/OBB61FD0C2F043B585256E1B00145539](http://www.inpofos.org/ppiweb/ltamn.nsf/$webindex/OBB61FD0C2F043B585256E1B00145539). [Consulta: 26/04/2007].
- García, J. y J. Espinosa. 2009. Relación entre el índice de verdor y la aplicación de nitrógeno en diez híbridos de maíz tropical en Colombia. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. 16-20 de Noviembre. Costa Rica.
- Gil, P., P. Fontes, P. Cecon y F. Ferreira. 2002. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. *Hortic. bras.* 20(4):611-615.
- Godoy, L., R. Villas B. y L. Büll. 2003. Utilização da medida do clorofilômetro no manejo da adubação nitrogenada em plantas de pimentão. *R. Bras. Ci. Solo.* 27:1049-1056.
- Godoy, L., T. da Silva, R. Villas y J. Leite. 2008. Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. *R. Bras. Ci. Solo* 32: 217-226.
- Godwin, D. y C. Jones. 1990. Nitrogen dynamics in soil-plant system. In: Hanks, R.J.; J.T. Ritchie (Eds.) *Modelling plant and soil system*. Monografía. Madison: ASA, CSSA, y SSSA. 3:86-112.

- González-Torres, A., U. Figueroa-Viramontes, J. Delgado, G. Núñez-Hernández, J. Cueto-Wong, P. Preciado-Rangel y A. Palomo-Gil. 2009. Calibración del SPAD-502 para evaluar requerimientos de nitrógeno en maíz forrajero. *Terra* 27(4):303-309.
- Gutiérrez, B. F., G. Rubio y R. Álvarez. 2012. Diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes. En: Álvarez, R., P. Prystupa, M. B. Rodríguez y C. R. Álvarez (Ed). *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región Pampeana*. Ed. Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina. pp:119-141.
- Haefner J. 1996. *Modeling biological systems: Principles and applications*. Chapman & Hall. N.Y. USA.
- Hergert, G. 1987. Status of residual nitrate-nitrogen soil tests in the United States of America. In: J.R. Brown (Ed). *Soil testing: Sampling, correlation, calibration and interpretation*. SSSA Spec. Publ. N°21. Madison, EE.UU. p. 73-83
- Hesse, P. 1971. *A textbook of soil chemical analysis*. Chemical Publishing Co., Inc. New York. 520p.
- Holford, I. y A. Doyle. 1992. Yield response and nitrogen fertilizer requirements of wheat in relation to soil nitrate levels at various depths. *Aust. J. Soil Res.* 30:683-694.
- Hurtado, S., A. Resende, C. Silva, E. Corazz y L. Shiratsuchi. 2011. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. *Ciência Rural, Santa Maria.* 41 (6):1011-1017.
- Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). 2005. *Manual de Alternativas de Recomendaciones de Fertilizantes para cultivos prioritarios en Venezuela. Serie manuales de Cultivo INIA 4. 1ª edición. (Versión Preliminar en CD)*. Maracay, Venezuela.
- Kebede, F. y C. Yamoah. 2009. Soil fertility Status and NuMaSS fertilizer recommendation of Typic Hapluusterts in the Northern Highlands of Ethiopia. *World applied Sciences Journal.* 6(11): 1473-1480.
- Levres, J. y F. Monteiro. 2006. Diagnose nutricional de nitrogênio no capim-aruaana em condições controladas. *R. Bras. Ci. Solo.* 30:829-837.
- Linn, D. y J. Doran. 1984. Effect of water-filled pores space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 84:1267-1272.
- López, M., B. Rodríguez y M. España. 2010. Tecnologías generadas por el INIA para contribuir al manejo integral de la fertilidad del suelo. *Agronomía Trop.* 60(4): 315-331.

- López de Rojas, I. y M. Silva de Zacarías. 2002. Sistema Experto para recomendaciones de cal en los suelos de Venezuela. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Maracay, Ven. (Serie D, N° 3). 47 p.
- Madeira, A., A. Mendonça, M. Ferreira y M. Taborda. 2000. Relationship between spectroradiometric and chlorophyll measurements in Green beans. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 31:631-643.
- Magdoff, F., D. Ross y J. Amadon. 1984. Soil test for nitrogen availability to corn. *Soil Science Society of America Journal, Madison.* 48:1301-1304
- Magdoff, F. 1991. Understanding the Magdoff presidress nitrate test for corn. *J. Produc. Agric.* 3:297-305.
- Malavolta, E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas. Ed. Agronômica Ceres. São Paulo, Brasil. 638 p
- Malavolta, E.; Vitti, G., DE Oliveira, S. 1997. Avaliacao do estado nutricional das plants. Principios e aplicacoes. Associacao Brasileira para pesquisa potassa e do fosfato. Piracicaba. Brazil 201p.
- Marcano, F. y C. Ohep. 1997. Respuesta del cultivo de maíz a tres prácticas de labranza, dos fuentes nitrogenadas y tres formas de aplicación del nitrógeno. *Agronomía Trop.* 47(1): 61-85.
- Marcano, F., C. Ohep y D. Francisco. 1994. Efecto de la labranza y del nitrógeno en algunos componentes del rendimiento. Macroporosidad del suelo, densidad radical y producción del maíz (*Zea mays* L.). *Agronomía Trop.* 44(1): 5-22
- Marcano, F., J. Guedez, C. Ohep y C. Colmenares. 1999. Uso de enmiendas y fertilizantes bajo el sistema de siembra directa con maíz (*Zea mays* L.) en suelos ácidos del estado Yaracuy. Memorias del XV Congreso venezolano de la ciencia del suelo. Noviembre 20 a diciembre 04. Lara, Venezuela. 250-255 p.
- Markwell, J., J. Osterman y J. Mitchell. 1995. Calibration of the Minolta SPAD-502 Leaf Chlorophyll Meter. *Photosynth. Res.* 46: 467-472.
- Maroko, J., R. Buresh y P. Smithson. 1998. Soil nitrogen availability as affected by fallow-maize systems on two soils in Kenya. *Biol Fertil Soils.* 26:229-234.
- Medina, S. y R. Ramírez. 1997. Comportamiento del maíz bajo dos condiciones de contenido de agua volumétrica del suelo. *Agronomía Trop.* 47(2): 201-215.
- Mendoza, S., G. Valera y C. Ohep. 1983. Estudio de suelo preliminar del Eje Morón-Barquisimeto-La Lucía- Estado Falcón, Carabobo, Yaracuy y Lara. Departamento de Suelos, MARN.

- Meléndez, L., J. Lisazo y R. Ramírez. 2001. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre dos variedades de maíz (*Zea mays* L.) sometidas a exceso de humedad en el suelo. *Bioagro* 13(3): 111-116.
- Merino, F. 1991. Sistema Experto para diagnóstico de plagas insectiles de maíz (*Zea mays* L.) en Centro América. *Agronomía Mesoamericana* 2: 80-88.
- Miao, Y., D. Mulla, W. Batchelor, J. Paz, P. Robert y M. Wiebers. 2006. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth.. *Agron. J.* 98: 545-553.
- Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierra (MAT). 2010. Resultados de VII Censo Agrícola Nacional. <http://www.mat.gob.ve/censoagricola>. [Consulta 14/11/2011].
- Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierra (MAT). 2011. El Maíz. Logros Cosechados. 15:2. http://www.mat.gob.ve/revista/15_revista.pdf.
- Miransari, M. y A. Mackenzie. 2011. Development of a soil N test for fertilizer requirements for corn production in Quebec. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 42:50-65.
- Mistrorigo, D. y O. Valentinuz. 2004. Fertilización de maíz en siembra directa en suelos Molisoles y Vertisoles del Oeste de entre Ríos. *RCA. Rev. Cient. Agropecu.* 8(1):99-107.
- Monasterio, P. F. Pierre, J. Tablante y W. Maturét. 2010. Rendimiento del maíz en los estados productores de Venezuela (1960 al 2007). *INIA Hoy*. 7: 288-291.
- Monasterio, P., P. García, G. Alejos, A. Pérez, J. Tablante, W. Maturét y L. Rodríguez. 2008. Influencia de la precipitación sobre el rendimiento del maíz: Caso híbridos blancos. *Agronomía Trop.* 58(1): 69-72.
- Montemurro, F., M. Maiorana y G. Lacertosa. 2007. Plant and soil nitrogen indicators and performance of tomato grown at different nitrogen fertilization levels. *J. Food, agriculture and Environment*. 2: 143-148.
- Morón, A., D. Cozzolino, A. García, J. Sawchik. 2002. Avances en la determinación rápida de nitrógeno en planta para cebada y trigo para el diagnóstico de refertilización. *Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI) Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 13: 11-13[online]: [http://www.inpofos.org/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex/3BB87D2898992D0B03256BA40054F347!opendocument](http://www.inpofos.org/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex/3BB87D2898992D0B03256BA40054F347!opendocument). [Consulta 10/05/2007].

- Mosquera, C. 2012. Producción de maíz, sorgo y café ha bajado cerca de 50% en 2012. Corresponsal Agronota. Consulta en línea: <http://agronota.com/2012/09/produccion-de-maiz-sorgo-y-cafe-ha-bajado-cerca-de-50-en-2012>. [15/12/2012]
- Neves, O., J. de Carvalho, F. Dias, T. Pereira y P. Pinho. 2005. Uso de SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila nitrogênio, enxofre, ferro y manganês do algodoeiro herbáceo. *Pesq. Agropec. Bras.* 40(5): 517-521.
- Nigussie, A. y E. Kassi. 2012. Physicochemical characterization of Nitisol in Southwestern Ethiopia and its fertilizer recommendation using NuMaSS. *Glo. Adv. Res. J. Agric. Sci.* 1(4): 66-73.
- Novoa, R. y N. Villagrán. 2002. Evaluación de un instrumento medidor de clorofila en la determinación de niveles de nitrógeno foliar en maíz. *Agricultura Técnica (Chile)* 62(1): 166-171.
- Ohep, C. 1999. Efectos de diferentes sistemas de labranza conservacionista en algunos atributos físicos del suelo que influyen sobre el cultivo del maíz (*Zea mays*. L.). Trabajo de Ascenso. Decanato de Agronomía. UCLA. Cabudare, Venezuela. 94p.
- Ohep, C. 2001. Cambios en la calidad del suelo por el uso continuo de labranza conservacionista en un Alfisol del Yaracuy Medio. Tesis Doctoral. Universidad Central de Venezuela. 250 p.
- Ohep, C. y A. Florentino. 2001. Selección de Indicadores e Índices de Calidad de suelo en un Alfisol de Yaracuy Medio. XVI Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Maracaibo, Venezuela.
- Oliveira, A., W. Garrido, J. Araujo de y S. Lourenço. 1991. Metodos de pesquisa em fertilidade do solo. EMBRAPA-Secretaria de Administração estratégica. Brasília, Brasil. pp 392.
- Olsen, S. y L. Dean. 1965. Phosphorus. In: Black, C.A. (Ed.) *Methods of soil Analysis*. Agronomy 9. Am. Soc. Agron. Madison Wis. Pp. 1044-1046.
- Osmond, D., T. Smyth, R. Yost, D. Hoag, W. Reid, X. Branch. y H. Li. 2004. Nutrient Management Support System [NuMass], version 2.1 soil Management Collaborative Research Support Program, North Carolina State University, Raleigh, NC. USA.
- Pampolino, M., C. Witt, J. Mae, A. Johnston y M. Fisher. 2012. Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 88: 103-110.

- Parton, W.J., J.W.B. Stewart y C.V. Cole. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* 5:109-131.
- Paustian, K., G.I. Agren y E. Bosatta. 1997. Modelling litter quality effects on decomposition and soil organic matter. In: E. Cadisch y K.E. Giller (Eds.). *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. CAB INTERNATIONAL. pp. 313-335.
- Pla, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelo en condiciones tropicales. *Alcance, Revista Fac. Agron. Universidad Central de Venezuela* (32). Maracay, Venezuela. 93 p.
- Pla, I. 1994. Soil degradation and climate induced risks of crop production in the tropics. *Trans 15th ISSS Congress Acapulco, México*. 1:163-188.
- Perdomo, C. y G. Cardellino. 2007. Respuesta de maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación. *Informaciones Agronómicas* #33: 17-24. [Online]: [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs,nf/0/04FD63FAAA345CAC8525799500785D18/\\$FILE/Romano.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs,nf/0/04FD63FAAA345CAC8525799500785D18/$FILE/Romano.pdf). [Consulta 10/05/2008].
- Pérez, D. y P. Dorta. 2003. Determinación de la dosis óptima de nitrógeno para la variedad de arroz FONAIAP 1, Zeta 15 y Fedearroz en época de lluvias en el Municipio Anzoátegui del Estado Cojedes. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Edo. Aragua.
- Piekielek, W. y R. Fox. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agronomy J.* 84: 59-65.
- Piekielek, W., R. Fox, J. Toth y K. MacNeal. 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agronomy J.* 87(3): 403-408.
- Pietrobon, M., P. Barbieri, F. Andrade y H. Echeverria. 2012. Diagnóstico del estatus nitrogenado del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) mediante el uso de SPAD y de Greenseeker. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16 al 20 de abril. Mar del Plata, Argentina.
- Prasad, R., A. Sinha y R. Ranjan. 2002. KISAN: an expert system for soil nutrient management. In: Mei Fangquan (Ed). *AFITA: Asian agricultural information technology & management*. Proceedings of the Third Asian Conference for

- Information Technology in Agriculture, Beijing, China, Octubre 26-28. pp. 346-353.
- Pratt, P. 1965. Potassium. In: C.A. Black (Ed). Methods of soil analysis, Parte 2. Agronomy 9. Am. Soc. Agron. Madison. Wisconsin. pp 1020-1030.
- Rambo, L.; P. Ferreira da Silva; G. Argenta y C. Bayer. 2004. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. Cienc. Rural. 34(4):1-10.
- Rambo, L., P. Ferreira da Silva; C. Bayer, G. Argenta, M.L. Strieder, A. Alves da S. 2007a. Teor de nitrato como indicador complementar da disponibilidade de nitrogênio no solo para o milho. R. Bras. Ci. Solo. 31: 731-738.
- Rambo, L; P. Ferreira da S., M. Strieder, L. Sangoi, C. Bayer y G. Argenta. 2007b. Monitoramento do nitrogênio na planta e no solo para predição da adubação nitrogenada em milho. Pesq. Agropec. Bras. 42(3): 407-417.
- Rambo, L, P. Ferreira da S., M. Strieder, C. Delatorre, C. Bayer y G. Argenta. 2008. Adequação de doses de nitrogênio em milho com base em indicadores de solo e de planta. Pesq. Agropec. Bras. 43(3): 401-409
- Ramírez, R. 1980. Nutrición del maíz en Venezuela. IV. Valores standard y adecuados de nitrógeno, fósforo, potássio, cálcio y magnésio para interpretación de análisis foliar en maíz. Agronomía Tropical. 30(1-6): 125-133.
- Ramírez, R., O. Beg, O. Colmenares, E. Meléndez, P. Marbal, F. Blanco, E. Guzmán, C. Hernández y A. Chirinos. 1988. Relación entre la Respuesta del maíz a la aplicación de fósforo y el P asimilable del suelo. Agronomía Tropical. 38(1-3): 5-20.
- Ramos, F., V. Ortíz, J. Mora, F. Padilla, F. Pattán y J. Macias. 2006. Desarrollo y Evaluación de un Sistema Experto (prototipo) que auxilie en el proceso de irrigación del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Aguascalientes. Investigación y Ciencia. 36: 15-21.
- Rengel, M. 2004. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en maíz (*Zea mays* L.) en Venezuela. INPOFOS, Informaciones Agronómicas 53: 5-8.
- Rezende, D., J. Muniz, D. Ferreira, F. Silva y L. Aquino. 2007. Ajuste de modelos de platô de resposta para a exigencia de zinco em frangos de corte. Ciênc. Agrotec. 31(2): 468-478
- Rivero, C. 1995. Efecto de la incorporación de residuos orgánicos sobre algunas propiedades de un Alfisol degradado. Venesuelos. 3(2): 55-61.

- Rivero, C. y A. Torres, 2010. Efecto del uso de coberturas sobre el nitrógeno mineral y total en macro y microagregados de un suelo ácido de los llanos centrales de Venezuela. *Rev. Fac. Agron.* 36(1): 7-11.
- Rivero, C., A. Torres y J. Ampueda. 2004. Efecto del uso de residuos orgánicos y fertilizantes sobre el comportamiento del nitrógeno mineral en el suelo. XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo.
- Robison, B. y R. Gordon. 1996. Farm Nutrient Management Expert System, In the Report of Canada/Nova Scotia Agreement on the Agriculture Component of the Green Plan. pp 21
- Rocha, R., J. Cardoso, P. Teixeira, G. Miranda, E. Agnes, P. Gomes y U. Leite. 2005. Relação do índice SPAD, determinado pelo clorofilômetro, com teor de nitrogênio na folha e rendimento de grão
- Rozas, H., H. Echeverría, G. Studdert y G. Domínguez. 2000. Evaluation of the Presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176-1183.
- Sainz, H. y H. Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estádios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata.* 103(1): 37-44.
- Salazar-Sosa, E., H. Trejo-Escareño, C. Vázquez-Vázquez, J. López-Martínez, M. Fortis-Hernández, R. Zuñiga-Tarango, J. Amado-Álvarez. 2009. Distribución de nitrógeno, disponible en suelo abonado con estiércol bovino en maíz forrajero. *Terra* 27(4): 373-382.
- Salinas-García, J. F. Hons y J. Smyth. 2008. NuMaSS: Manejo de Nutrimientos de cultivos 2007-2008. Memorias. 3era Reunión de Innovación Agrícola y Forestal. Instituto Nacional de Investigaciones Forestal, Agrícolas y Pecuarias. Yucatán, México. [online]:
<http://www.corpoica.org.co/sitioWeb/Documento/JatrophaContrataciones/MEMORIARNIAF.pdf>. [Consulta 05/04/2013].
- Salvagiotti, F., H. Pedrol, J. Castellarín, J. Capurro, J.C. Felizia, A. Gargicevich, O. Gentili, J. Méndez y N. Trentino. 2002a. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. I.- Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. [online]:
<http://www.futurosyopciones.com/granos/produccion/especiales/maiz/imprimir.asp?IDInformacion=25308>. [Consulta 06/05/2007].

- Salvagiotti, F., H. Pedrol y J. Catellarin. 2002b. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. II.- Relación entre la respuesta en rendimiento y la concentración de de N-NO₃ en el suelos en el estadio V₄-V₆. [online]: <http://www.futurosyopciones.com/granos/produccion/especiales/maiz/imprimir.asp?IDInformacion=25308>. [Consulta 06/05/2007].
- Samborski, S., N. tremblay y E. Fallon. 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy. J.* 101: 800-816.
- Sánchez, A, V. Rodríguez, J. Lorbes, L. Figueredo y A. Rivero. 2009. Calibración de Lecturas de clorofilómetro en hojas de *Zea mays* L. en el Valle Medio del Río Yaracuy, Estado Yaracuy. *Unell. Cienc. Tec.* 27: 83-84
- Sánchez, A., V. Rodríguez, S. Chávez y J. Lorber. 2008. Efecto del nivel de nitrógeno y fertilización P- K sobre el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.). *Rev. Unell. Cienc. Tec.* 26: 62-70.
- Santos, D., N. Poletto y C. Mundstock. 2009. Teores de nitrogênio mineral do solo para predição do potencial productivo de Cevada. *R. Bras. Ci. Solo.* 33: 1745-1754
- SAS Institute Inc. 1999. SAS/STAT User's Guide, Version 8, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Scian, M., M. Gerosa, S. de Oliveira, W. Ribeiro y R. Amanile. 2008. Avaliação da disponibilidade de nitrogênio no solo para o trigo em Latossolo vermelho do Distrito Federal. *R. Bras. Ci. Solo.* 32: 1941-1948.
- Scharf, P., S. Brouder y R. Hoefl. 2006. Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the North-Central USA. *Agronomy J.* 98 (3): 655-666.
- Schröder, J., J., Neeteson, C. Withagen; I.G. Noij. 1998. Effects of N application on agronomic and environmental parameters in silage maize production on Sandy soils. *Field Crops Research.* 58:55-67.
- Segovia, V. y Y. Alfaro. 2009. El maíz: Rubro estratégico para la soberanía agroalimentaria de los venezolanos. *Agronomía Trop.* 59(3): 237-247.
- Setiyono T., H. Yang, D. Waters, A. Dobermann, R. Ferguson, D. Roberts, D. Lyon, D. Clay, y K. Cassman. 2011. Maize-N: A decision tool for nitrogen management in Maize. *Agron. J.* 103: 1276-1283.
- Silva F., P. Rezende, M. Puiatti, J. Lima y M. Castro. 2010. Dose de nitrogênio associada á produtividade de Batata e índices do estado de nitrogênio na folha. *Rev. Bras. Ci. Solo.* 34: 1175-1183.

- Silva, M., P. Fontes, G. Miranda. 2007. Modelos estadísticos para descrever a produtividade de batata em função da adubação nitrogenada. *Hortic. Bras.* 25(3): 360-364.
- Silveira, P., A. Braga y A. Didonet. 2003. Uso do clorofilometro como indicador da necessidade de adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro. *Pesq. Agropec. Bras.* 38(9): 1083-1087.
- Skaggs T., M. Van Genuchten, P. Shouse, y J. Poss. 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of soil water and salinity stress. *Agricultural Water Management.* 86:140-149.
- Smyth, T., D. Osmond, R. Yost, D. Hoag, W. Reid, W. Branch, X. Wang y H. Li. 2007. Nutrient Management Support System (NuMaSS), v. 2.2. Soil Management Collaborative Research Support Program, Universidad del Estado de Carolina del Norte, Raleigh, NC.
- Solórzano, P. 1997. Fertilidad de suelos, su manejo en la producción agrícola. *Revista de la Facultad de Agronomía. Alcance* 51. Facultad de Agronomía. UCV. Maracay. Venezuela.
- Soratto, R., M. Carvalho y O. Arf. 2004. Teor de clorofila e produtividade do feijoeiro em razão da adubação nitrogenada. *Pesq. Agropec. Bras.* 39 (9):895-901.
- Spargo, J., M. Alley, W. Thomason y S. Nagle. 2009. Illinois soil nitrogen test for prediction of fertilizer nitrogen needs of corn in Virginia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(2):434-442.
- Stott, D. 1991. A tool for soil conservation education. *J. Soil water Conserv.* 46: 332-333.
- Tisdale, S., W. Nelson, J. Beaton y J. Havlin. 1993. *Soil fertility and fertilizers.* 5th Ed. MacMillan New Cork, N.Y.
- Torín, C. 2007. Manejo del cultivo de maíz en el estado Apure. Parte I. INIA Divulgación 10: 24-28.
- Trejo, M., M. Ayarza, D. Finney y J. Smyth. 2006. Use of the Nutrient Management Expert System NuMaSS to improve management of nitrogen in Maize-based systems in hillsides of Honduras and Nicaragua. Poster presented at the 18th World Congress of Soil Sciences. Philadelphia, USA.
- Verberne E., J. Hassink, P. De Willigen, J. Groot, y J. Van Veen. 1990. Modelling organic matter dynamics in different soils. *Netherlands J. Agric. Sci.* 38: 221-238.

- Videla, X., A. Parada, A. Nario, I. Pino y R. Hood. 2005. Efecto del contenido de agua en la mineralización bruta e inmovilización de nitrógeno. *Agric. Téc.* 65(1):74-78.
- Walker, T., J. Friday, M. Casimero, R. Dollentas, A. Mataia, R. Acda y R. Yost. 2009. The early economic impact of a nutrient management decision support system (NuMaSS) on small farm households cultivating maize on acidic, upland soils in the Philippines. *Agr. Syst.* Xxx
- Waskom, R., D. Westfall, D. Spellman y P. Soltanpour. 1996. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27(3-4): 545-560.
- Witt, C., T. Fairhurst, J. Sheehy, A. Dobermann y A. Gfroerer-Kerstan. 2005. A Nutrient Decision Support System Software for Irrigated Rice. *Better Crops.* 89 (4): 24-28.
- Wolfe, D., D. Henderson, T. Hsiao y A. Alvino. 1988. Interactive water and nitrogen effects on senescences of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves. *Agronomy J.* 80: 865-870.
- Yadava, U. 1986. A rapid and non destructive methods to determine chlorophyll in intact leaves. *Hort Science* 21: 1449-1450.
- Yost, R., Y. Tamimi, J. Silva, N. Hue y C. Evensen. 1997. How Fertilizer Recommendations are made in the FACS software (Fertilizer Advice and Consulting System). *Hawaii Soil Fertility Manual.*
- Zotarelli, L., E. Garcia C., J. Piccinin, S. Urquiaga, R. Boddey, E. Torres y B. Rodrigues A. 2003. Calibração do medidor de clorofila Minolta SPAD-502 para avaliação do conteúdo de nitrogênio do milho. *Nota Técnica. Pesq. Agropec. Bras.* 38(9): 1117-1122.
- Zebarth, B., M. Younie, J. Paul y S. Bittman. 2002. Evaluation of leaf chlorophyll index for making fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in a high fertility environment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33(5y6): 665-684.
- Zhang, J., A. Blackmer, J. Ellsworth y K. Koehler. 2008. Sensitivity of chlorophyll meters for diagnosing nitrogen deficiencies of corn in production agriculture. *Agronomy J.* 100 (3): 543-550.