

EFFECTOS DE LA INOCULACION Y LA FERTILIZACION NITROGENADA
SOBRE LA PRODUCCION DE SOYA (*Glycine max* (L) Merrill)

Tesis de Grado de Magister Scientiae

JOSE GABRIEL SALINAS CASTRO



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales
Turrialba, Costa Rica
Marzo, 1973

EFFECTOS DE LA INOCULACION Y LA FERTILIZACION NITROGENADA
SOBRE LA PRODUCCION DE SOYA (Glycine max (L) Merrill)

Tesis

Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados
como requisito parcial para optar al grade de

Magister Scientiae

en el

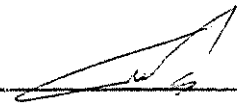
Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:



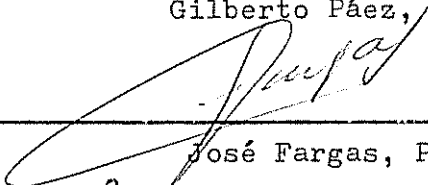
Rufo Bazán S., Ph.D.

Consejero




Gilberto Pérez, Ph.D.

Comité



José Fargas, Ph.D.

Comité



Donald Oelsligle, Ph.D.

Comité

Marzo, 1973

A mis padres

A mi esposa

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento al Dr. Rufo Bazán S., Consejero Principal, por la valiosa y acertada dirección en la ejecución del presente trabajo.

Al Dr. Gilberto Páez, miembro del Comité Consejero, por su asesoramiento y consejos en el campo de la Estadística.

A los Dres. José Fargas y Donald Oelsligle, miembros del Comité Consejero, por las sugerencias y colaboración en la revisión del original.

Al Dr. Mario Blasco, ex-miembro del Comité Consejero.

Agradece sinceramente al Gobierno de Holanda por haberle otorgado la beca y al Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA por la oportunidad brindada para ingresar a la Escuela para Graduados del IICA-CTEI.

A todas las personas que le prestaron su gentil colaboración durante el planeamiento y desarrollo del presente estudio.

BIOGRAFIA

El autor nació en Cochabamba, Bolivia, el 12 de marzo de 1945.

Realizó sus estudios de bachillerato en el Colegio Nacional Sucre y los profesionales en la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, graduándose de Ingeniero Agrónomo.

Durante sus estudios universitarios, desempeñó labores docentes en calidad de ayudante de cátedra y jefe de trabajos prácticos en las asignaturas de suelos y fisiología vegetal.

A partir de 1969 prestó sus servicios profesionales a la Facultad de Ciencias Agrícolas y Escuela Técnica de Agricultura, Universidad Mayor de San Simón, como catedrático de suelos y tecnología vegetal, siendo nombrado posteriormente Coordinador del Departamento de Tecnología Agrícola.

En octubre de 1971 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA en Turrialba, Costa Rica, para realizar estudios de postgrado en la especialidad de suelos, habiendo obtenido el grado de Magister Scientiae en marzo de 1973.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	3
3. MATERIALES Y METODOS	13
3.1 Localización del estudio	13
3.2 Suelo	13
3.3 Inoculante y fertilizantes	14
3.4 Variedad de soya	15
3.5 Diseño del experimento	16
3.5.1 Distribución de tratamientos	16
3.6 Manejo del experimento en el invernadero	18
3.6.1 Fase inicial de experimentación	18
3.6.1.1 Preparación y establecimiento del experimento	18
3.6.2 Fase de experimentación	19
3.6.2.1 Desarrollo del experimento	19
3.6.2.2 Contrd fitosanitario	19
3.6.3 Fase final de experimentación	20
3.6.3.1 Cosecha y recolección de datos	20
3.6.3.2 Contenido y producción de proteína cruda en la semilla	21
3.7 Análisis estadístico de los resultados	22
4. RESULTADOS	25
4.1 Características físicas y químicas del suelo ...	25
4.1.1 Densidad aparente	25
4.1.2 Densidad de partículas	25
4.1.3 Porosidad total	27
4.1.4 Porosidad capilar (Índice de textura) ..	27
4.1.5 Porosidad no capilar	27

4.2	Efecto de tratamientos sobre la producción de soya	29
4.3	Efecto de tratamientos sobre la producción de proteína cruda en la semilla	32
4.4	Efecto de tratamientos sobre otros componentes del rendimiento	38
4.5	Curvas de producción	38
5.	DISCUSION	41
5.1	Ecofitograma	41
5.2	Propiedades físicas y químicas del suelo	41
5.3	Rendimiento y producción de proteína cruda en la semilla	44
5.4	Otros componentes del rendimiento	47
6.	CONCLUSIONES	49
7.	RESUMEN	51
7a.	SUMMARY	53
8.	LITERATURA CITADA	54
	AFENDICE	60

LISTA DE CUADROS

<u>TEXTO</u>	<u>Página</u>
Cuadro Nº	
1	Determinaciones realizadas y métodos empleados 15
2	Relación de valores reales y codificados 16
3	Combinación de factores, dosis y tratamientos .. 17
4	Rendimiento promedio por planta (g) y rendimiento equivalente en kg/ha 30
5	Producción promedio de proteína cruda en la semilla (g) y producción equivalente en kg/ha 34
6	Matriz de correlación de las características estudiadas en soya 39
<u>APENDICE</u>	
1	Características físicas del suelo en estudio (Santa Cruz, Guanacaste) 61
2	Características químicas del suelo en estudio (Santa Cruz, Guanacaste) 62
3	Estandar provisional de comparación para categorías y límites adecuados 63
4	Valores de porosidad del suelo 64
5	Análisis de variancia del efecto de los tra- tamientos sobre el rendimiento de soya, variedad Hark 65
6	Análisis de variancia del efecto de trata- mientos sobre la producción de proteína cruda en la semilla de soya, variedad Hark 65

Cuadro Nº

Página

7	Efecto de la inoculación, fertilización nitrogenada y época de aplicación de nitrógeno sobre otros componentes del rendimiento	66
---	--	----

LISTA DE FIGURAS

<u>TEXTO</u>	<u>Página</u>
Figura N ^o	
1 Ecofitograma ilustrando la relación estructural entre el suelo, el medio externo y la respuesta de la planta	26
2 Configuración geométrica del rendimiento de soya de acuerdo con la transformación canónica	33
3 Configuración geométrica de la producción de proteína cruda en la semilla de acuerdo con la transformación canónica	37
 <u>APENDICE</u>	
4 Curvas de producción indicando las variaciones del rendimiento como resultado de la interacción de los tres factores en estudio	67
5 Curvas de producción indicando las variaciones de la producción de proteína cruda en la semilla como resultado de la interacción de los tres factores en estudio	68

1. INTRODUCCION

De los elementos mayores incorporados al suelo como fertilizantes, el nitrógeno constituye uno de los nutrimentos de mayor incidencia en la productividad de muchos suelos, especialmente en áreas tropicales y subtropicales donde su deficiencia se traduce en una reducción considerable en el rendimiento de los cultivos.

En general, las necesidades de nitrógeno de las leguminosas son elevadas, pero debido al carácter simbiótico que tienen con bacterias nitrificantes, poseen la facultad de utilizar el nitrógeno atmosférico, supliendo de esta manera esas exigencias sin el requisito de una fertilización nitrogenada. Sin embargo, de esta afirmación, la respuesta de las leguminosas a la fertilización nitrogenada presenta una alta variabilidad que parece depender fundamentalmente del nivel de fertilidad natural del suelo y de la relación entre el nitrógeno proveniente de la fertilización y de la fijación simbiótica.

En el caso particular de la soya (Glycine max (L) Merrill), leguminosa de importancia cada vez mayor en los países de América Latina como fuente principal de proteína y aceite, el incremento de su producción radica en el resultado de las interacciones entre la planta y los factores de producción, factores que no pueden ser alterados, sobre todo los climáticos. Sin embargo, se ha podido demostrar que por medio de la fertilización se puede mejorar la disponibilidad de los nutrimentos y por ende incrementar los rendimientos.

Las investigaciones llevadas a cabo sobre la fertilización nitrogenada en soya, presentan hasta cierto punto una contradicción en

los efectos provocados por el nitrógeno combinado (N-simbiótico y N-fertilizante) en relación a la respuesta de esta leguminosa, situación que sugiere la necesidad de una mayor investigación.

La inoculación de las leguminosas consiste en añadir al suelo un cultivo fresco de bacterias nitrificantes de alto poder de fijación de nitrógeno con el propósito de enriquecer los suelos con nitrógeno del aire para el incremento de la producción de las leguminosas y de los cultivos subsiguientes. Por otra parte, las dosis óptimas de fertilización en soya fluctúan debido a la gran variación de la fertilidad natural y de otras propiedades de los suelos; en consecuencia, una generalización de los datos no conduce a conclusiones valederas y por este motivo es conveniente considerar a cada suelo como una entidad separada para encontrar dichas dosis óptimas.

Con base en las consideraciones anteriores, la presente investigación tiene como objetivo general, estudiar los efectos de la inoculación y de la fertilización nitrogenada sobre la producción de soya. Los objetivos específicos son:

1. Estimar las dosis de inoculante y nitrógeno y la época de aplicación de nitrógeno que maximizan el rendimiento.
2. Determinar los efectos de los tratamientos en estudio sobre la producción de proteína cruda en la semilla y en otros componentes del rendimiento.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Inoculación y fertilización nitrogenada en soya

Las leguminosas juegan un papel importante en la fertilidad de los suelos y reciben atención por tener un grupo que fija biológicamente el nitrógeno atmosférico en nódulos, los cuales son formados en las raíces de la planta en asociación simbiótica con bacterias del género Rhizobium. Asociación de beneficio mutuo, donde las bacterias reciben nutrimentos necesarios y las leguminosas obtienen aminoácidos, producción final de las bacterias, que son utilizados por la planta para su nutrición y síntesis de proteína (42, 56).

El principal papel de la inoculación, es el de fijar el nitrógeno atmosférico haciéndolo asimilable por la planta a través de los nódulos (23). Andrews, citado por Weiss (61) indica que el sulfato de amonio aplicado en grandes cantidades aumenta considerablemente el rendimiento en plantas de soya provenientes de semillas inoculadas. Este efecto lo explica en el sentido de que la aplicación de elevadas cantidades de sulfato de amonio no inhibía la fijación de nitrógeno por los nódulos. Sin embargo, Norman y Krampitz (41) señalan que la adición abundante de nitrógeno como fertilizante disminuye la adsorción de nitrógeno fijado. Por otra parte, Fred y otros, citados por Weiss (61) sostienen que el único período en que la planta toma nitrógeno no fijado es cuando el nitrógeno del cotiledón se agota y no existen nódulos para la fijación.

Raggio y Raggio (46) informan que es difícil evaluar la mayoría

de los experimentos en los cuales se estudian los niveles de nitrógeno o cualquier nutrimento en relación con la nodulación o fijación, porque no se toman precauciones en la variabilidad de los factores, principalmente externos. Se ha observado que los nitratos tienen acción depresiva sobre la formación de los nódulos (50). Por otra parte, se menciona que existe alguna interacción de relativa importancia entre el nitrato externo y el nitrógeno combinado con la planta, problema que está en la cantidad de nitrógeno presente en el suelo y en la relación C:N (45).

White et al (62) señalan que si se fertilizan las leguminosas con fertilizantes compuestos que contienen nitrógeno, la absorción de este elemento puede ajustarse a una relación C:N y se reduce la fijación de nitrógeno. Además, consideran que la relación C:N afecta también la formación de nódulos en la planta y un alto nivel de nitrógeno contenido en los fertilizantes compuestos incorporados al suelo, impediría la deformación de los pelos absorbentes de las raíces.

Vincent (57) indica que el nitrito con el Rhizobium puede producir nitrato, ocasionando la transformación del ácido indolacético que había sido sintetizado, siendo ésta una explicación racional de la acción limitante del nitrato y nitrito. Por otra parte, el citado autor señala que las aplicaciones de 50, 112 y 168 kg/ha de fertilizante nitrogenado, causaron progresivamente una reducción en la formación del tejido nodular en soya.

Harper y Cooper (29) indican que el nitrógeno combinado

(N-simbiótico y N-fertilizante) en relación a la respuesta de la soya, constituye la causa principal del efecto inhibitorio de la nodulación, debido a la reducción que provoca en el número y tamaño de nódulos y en la disminución del contenido de hemoglobina en el tejido nodular. Abu-Shakra y Bassiri (2) indican que los efectos de la fertilización nitrogenada y la inoculación de la semilla de soya sobre el número de vainas/planta, número de nudos/planta, rendimiento en grano y porcentaje en contenido proteico no fueron significativos. Por otra parte, Abel y Erdman (1) y Johnson, Means y Weber (32) reportan que no hubo diferencias en el crecimiento, rendimiento y otras características entre plantas de soya inoculadas y no inoculadas que fueron cultivadas en suelos que contenían bacterias específicas de la nodulación.

Norman (42) encontró incrementos del 31 por ciento en el rendimiento y del 11 por ciento en el contenido de proteína en cultivos de soya, incrementos que los atribuye a la inoculación adecuada de la semilla y no a la fertilización nitrogenada que recibieron las plantas. Harwing, citado por Guédez (22) señala que la soya no responde favorablemente a la fertilización nitrogenada cuando la inoculación de la semilla se efectúa en forma adecuada. Además, sostiene que cuando no ocurre la formación de nódulos en las raíces de la planta, ésta requiere la aplicación de nitrógeno del mismo modo que el algodón o el maíz. Thornton (55) indica que los rendimientos de soya fueron incrementados significativamente por adición combinada de nitrógeno, pero que la cantidad de nitrógeno fijado en plantas de soya provenientes de semillas inoculadas que recibieron la adición de

nitrógeno fue inversamente proporcional a la cantidad de nitrógeno añadido.

Nelson (39) señala que la adición de nitrógeno rara vez produce una respuesta económica en soya, ya que la bacteria Rhizobium japonicum incorporada al suelo generalmente suministra, por medio de la fijación simbiótica, cantidades adecuadas de nitrógeno para obtener rendimientos satisfactorios. Sin embargo, si las semillas de soya son pobremente inoculadas o si las plantas se desarrollan en suelos ácidos, la adición de nitrógeno probablemente dará una respuesta favorable. Por otra parte, la adición de nitrógeno por medio de la fertilización tiende a disminuir la fijación del nitrógeno en los nódulos sin aumentar los rendimientos. Sin embargo, García y Moncada (18) indican que la práctica combinada de inoculación y fertilización nitrogenada es necesaria para obtener los óptimos rendimientos en soya.

Los trabajos de Weber (60), Kapusta (33), Streuber (53) y Smith, Hutton y Robertson (52) probaron que la nodulación en soya disminuyó gradualmente con el incremento de la fertilización nitrogenada. Yoshida y Yatdzawa (63) indican que existe un proceso inhibitorio de la nodulación en presencia de nitritos y nitratos y no así en presencia de amonio. Sin embargo, Gibson y Nutman (20) y MacConnell y Bond (36) informan que un bajo contenido de nitrógeno (alrededor de 5 ppm y aún hasta 50 ppm) es beneficioso para la nodulación y fijación si es aplicado en forma de nitratos.

Pequeñas cantidades de nitrógeno pueden, sin embargo, ser

útiles al inicio de la fijación del nitrógeno atmosférico, cantidades mayores pueden tener efectos de reducir la cantidad de nitrógeno fijado (56). La influencia benéfica de la acción de pequeñas dosis de nitrógeno, al igual que los efectos favorables que producen los fertilizantes fosforados y potásicos deben relacionarse, más bien, con el vigor y desarrollo que adquiere la planta y no con la fijación en sí (7).

2.2 Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción de soya

Hammond, Black y Norman, citados por Walker y Long (58) señalan que el efecto de la fertilidad del suelo y de los fertilizantes sobre la producción de la soya ha sido motivo de una serie de investigaciones, las cuales sugieren que la producción de soya fue incrementada con un aumento en el nivel de la fertilidad del suelo, pero que una respuesta beneficiosa de la soya a la aplicación directa de fertilizantes, especialmente nitrogenados, no es tan positiva como en otros cultivos. Sin embargo, Lathwell y Evans (42) enfatizan la importancia del nitrógeno en la obtención de máximos rendimientos en soya, en el sentido de que la producción de esta leguminosa está correlacionada con la cantidad de nitrógeno acumulado durante todo el ciclo vegetativo y particularmente por el nivel de nitrógeno disponible durante el período de floración. Además, Erdman y Mears (42) confirman esta importancia del nitrógeno al encontrar elevados coeficientes de correlación entre el N-total y la materia seca en investigaciones sobre el cultivo de soya.

Estudios realizados por Ghorashy, Niknejad y Kheradnam (19) en Irán, sobre el efecto de la época de siembra, fertilización nitrogenada e inoculación sobre el rendimiento de soya, encontraron que aplicaciones de 85 kg por hectárea de nitrógeno durante la época de floración de las plantas provenientes de semilla inoculada, provocaron un alto rendimiento (2.014 kg/ha) en comparación con el testigo (1.795 kg/ha).

Howell (27), Ohlarogge (46) y Weiss (61) estudiaron las relaciones concernientes entre la fertilización nitrogenada, nodulación, fijación nitrogenada y rendimiento en cultivos de soya. Estos estudios y el trabajo de Allos y Bartholomew (3), muestran que el número y tamaño de los nódulos no son reducidos con la adición de nitrógeno. Además, reportan que la fijación simbiótica del nitrógeno por Rhizobium japonicum no es suficiente para producir los más altos rendimientos posibles.

Ratner y Samoylova (47) señalan que en plantas de soya fertilizadas con nitrógeno mineral, el nitrógeno atmosférico fue fijado en su mayor parte durante el período de formación del fruto; sin embargo, remarcan que bajo condiciones favorables el efecto inhibitorio del fertilizante nitrogenado puede ser superado y ser fijado el nitrógeno atmosférico en el período de crecimiento vegetativo. Además, señalan que el desarrollo acelerado de las raíces, resultante de la fertilización nitrogenada, favorece en mejor forma a las plantas que se desarrollan en suelos que presentan una baja disponibilidad de fósforo, potasio, molibdeno, siendo ésta una razón para explicar la intensa

fijación del nitrógeno atmosférico durante el período de formación del fruto.

Según Kapusta (33) la fertilización nitrogenada aplicada a suelos deficientes en materia orgánica (1,4%) provocó un incremento en la producción de soya, incremento que no fue justificado desde el punto de vista económico; sin embargo, remarca que el incremento de la fertilización nitrogenada aumentó el porcentaje del contenido proteico en los granos de soya.

Singh y Singh (51) indican que el rendimiento en grano y el contenido de proteína en soya fueron incrementados con la fertilización nitrogenada, obteniendo un mayor incremento en la producción y un contenido máximo de proteína en el grano con la aplicación de 10 kg/ha de nitrógeno.

Lin y Lian (34) observaron que los efectos de la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio sobre la producción de soya, no fueron significativos, pero que el fósforo y el potasio parecen haber sido beneficiosos y recomiendan como dosis óptima de fertilización la aplicación de 5 kg/ha de N, 20 kg/ha de P_2O_5 y 20 kg/ha de K_2O .

Investigaciones preliminares realizadas en Guanacaste, Costa Rica, determinan que la fertilización nitrogenada sin la aplicación de inoculante origina plantas de soya mejor desarrolladas e incrementa los rendimientos (21).

Patiño, citado por Guédez (22), como resultado de experiencias realizadas con el objeto de evaluar la respuesta de la soya a varias combinaciones de N, P y K y determinar la fórmula fertilizante más

económica, obtuvo el más alto rendimiento (1.685 kg/ha) con las combinaciones 25-50-50 y 50-100-100.

Guédez (22) concluye que la acción conjunta de nitrógeno y fósforo originó los más altos rendimientos en soya sin la adición de potasio. Hanway y Weber (26) señalan que la fertilización nitrogenada provocó un incremento significativo en el rendimiento de soya, influyendo además en forma favorable sobre el tamaño y número de granos por hectárea cultivada. Sin embargo, Chesney, Khan y Bisessar (14) concluyen que la fertilización nitrogenada no provocó efectos sobre la producción, nodulación o contenido de aceite, influyendo únicamente en un aumento del contenido proteico en el grano de soya.

Neunyllov y Slabko (40) observaron que la mayor acumulación de nitrógeno en los granos de soya provenía de la adición de fertilizante nitrogenado y no del nitrógeno atmosférico. Por otra parte, Arruda, Dobereiner y Germer (4) señalan que hubo una regresión altamente significativa en dos experimentos, entre el peso de nódulos y la producción, indicando que una fijación simbiótica fue factor limitante en la producción de soya, especialmente en ausencia de fertilización nitrogenada. Además, observaron que la fertilización nitrogenada fue más eficiente que la inoculación en la producción de soya.

Yoshihara y Kawanhee (42) concluyen que una fuente externa de nitrógeno es requerida solamente en las primeras semanas de desarrollo de las plantas de soya, la adición posterior de nitrógeno no incrementa el rendimiento. Sin embargo, investigaciones intensivas llevadas a cabo en Iowa, usando N^{15} , observaron un incremento de los

rendimientos en soya por medio de la adición combinada de nitrógeno en diferentes etapas de desarrollo de las plantas.

La época de aplicación del fertilizante nitrogenado en soya parece constituir un factor importante en la efectiva utilización del nitrógeno por parte de las plantas. Investigaciones realizadas por Lyons y Earley (35) empleando nitrato de amonio como fertilizante, encontraron que la adición de pequeñas cantidades de nitrógeno durante la etapa inicial de desarrollo fue beneficiosa al suplir la demanda considerable de nitrógeno en ese estado de desarrollo. Por otra parte, señalan que la aplicación temprana de nitrógeno incrementó el contenido de este elemento en las semillas.

Haghiri (24) estudió la influencia de los elementos macronutrientes sobre la composición de los aminoácidos en plantas de soya, encontrando que un exceso o deficiencia de nitrógeno incrementó la concentración de aminoácidos en la parte aérea, mientras que el contenido de aminoácidos aumentó en las raíces con el incremento de las aplicaciones de nitrógeno en la solución nutritiva. Señala además que los aminoácidos: ácido aspártico, alanina, leusina, glicina y ácido glutámico fueron encontrados en grandes cantidades, mientras que pequeñas cantidades de metionina y trazas de cistina fueron detectadas, y que el contenido de ácido aspártico, arginina e histidina en la parte aérea parece estar influido por los tratamientos nitrogenados. Finalmente, señala que la calidad de las plantas de soya está afectada por el grado de disponibilidad del nutrimento durante el desarrollo de la planta y en general, plantas de soya con alto contenido

de aminoácidos pueden ser obtenidas, cuando éstas se desarrollen bajo condiciones donde los macro y micronutrientes estén presentes en cantidades suficientes y en un balance adecuado.

Allos y Bartholomew (3) concluyen que solamente alrededor del 50 a 75 por ciento del N-total para rendimientos máximos deberá ser suministrado por procesos de fijación.

Es de primordial importancia enfatizar el hecho de que a medida que se aumenta el nivel del nitrógeno disminuye la nodulación, pero hasta cierto nivel aumenta económicamente los rendimientos. Esto indica que la influencia de la bacteria no es de necesidad fundamental para obtener una buena producción, lo que requiere la planta es tener una fuente de nitrógeno disponible (12).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización del estudio

La presente investigación se llevó a cabo en un invernadero del Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales del Centro Tropical de Enseñanza e Investigación del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, en Turrialba, Costa Rica. Durante el período experimental en el invernadero la temperatura media fue de 25,7°C, la máxima de 32,8°C, la mínima de 18,7°C y la humedad relativa media de 72,6 por ciento, la máxima 95,5 por ciento y la mínima 49,6 por ciento. Las condiciones externas durante el tiempo del ensayo fueron: temperatura media 21,3°C, máxima 26,1°C, mínima 18,1°C y humedad relativa media 88,9 por ciento, máxima 95,8 por ciento y mínima 59,0 por ciento.*

3.2 Suelo

El suelo utilizado en el ensayo corresponde al horizonte superficial (0-20 cm) obtenido en las cercanías del municipio de Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. La elección se hizo de acuerdo a las condiciones generales que ofrece la zona para el cultivo de la soya. Según el estudio realizado por Harris, Neumann y Stouse (30), los suelos de esta región pertenecen al orden Alfisoles y ecológicamente al bosque tropical seco, según clasificación de Holdridge.**

* Estación meteorológica del IICA-CTEI.

** Holdridge, L. IICA-CTEI. Comunicación personal.

El muestreo se realizó en varios lugares en un lote cuya área se aproxima a una hectárea, obteniéndose aproximadamente una muestra compuesta de 200 kilos, extrayendo de 10 lugares porciones de suelo hasta la profundidad de 20 cm. El suelo se secó al aire, se tamizó en mallas de 5 mm y se homogeneizó. Posteriormente se llevó el suelo a una pila donde se fumigó con Dow Fume MC 2 (bromuro de metilo) por 24 horas para evitar la presencia de organismos dañinos que perjudiquen la germinación de la semilla y el desarrollo posterior de la bacteria Rhizobium japonicum. Además, se tomaron muestras de suelo a diferentes profundidades (26, 41 y 90 cm) de acuerdo a las condiciones del perfil, con el propósito de caracterizar algunas proiedades físicas y químicas del suelo en estudio. Los análisis se realizaron sobre muestras secadas al aire y tamizadas al tamaño requerido por cada método, indicados en el Cuadro 1.

3.3 Inoculante y fertilizantes

De acuerdo con los tratamientos, la semilla se inoculó con el producto comercial "Nitragin", adquirido de Nitragin Co., Milwaukee, Wisconsin.

Como fuente de nitrógeno se empleó el fertilizante nitrato de amonio (33,5% N). Según los niveles de fertilizante recomendados en el trabajo realizado por Martini (37), se efectuó una aplicación básica de todos los otros nutrimentos, con excepción del azufre para no tener interferencias con los posibles efectos del nitrógeno.

Cuadro 1. Determinaciones realizadas y métodos empleados.

DETERMINACION	METODO	REFERENCIAS
Tamaño de partículas	Bouyoucos	(8), (43)
Densidad aparente	Cilindro	(17), (28)
Densidad de sólidos	Blake	(6)
Retención de humedad	Richards	(17), (48)
Reacción del suelo (pH)	Peech	(44)
Materia orgánica	Walkley y Black	(49)
Nitrógeno total e intercambiable	Bremmer	(11)
Fosforo disponible	Bray y Kurtz 1	(10), (49)
Azufre extraíble	Chaudry y Cornfield	(13)
Bases cambiables (K, Ca y Mg)	Bower <u>et al</u>	(9)
Capacidad de intercambio catiónico	Bower <u>et al</u>	(9)
Humedad gravimétrica, humedad volumétrica, porosidad total y espacio aéreo	--	(17)

3.4 Variedad de soya

Se utilizó la variedad comestible de soya (Glycine max (L) Merrill) denominada Hark, cuyas características principales son:

erecta, semiarbusiva, crecimiento del tallo indeterminado y con granos de color amarillo.*

3.5 Diseño del experimento

Se utilizó un diseño de superficie de respuesta con arreglo de composición central y rotatable de la forma $2^3 + 3 \times 2 + 6$. Los factores estudiados son los siguientes: 1) inoculación, 2) fertilización nitrogenada, y 3) época de aplicación de nitrógeno.

Cuadro 2. Relación de valores reales y codificados.

DOSIS	C O D I G O				
	-1.682	+1	0	+1	+1.682
Inoculante (X_1)	0.6	2.0	4.0	6.0	7.4 (g/kg semilla)
Nitrógeno (X_2)	1.0	25.0	60.0	95.0	119.0 (kg/ha)
Epoca de aplicación de nitrógeno (X_3)	3.0	8.0	15.0	22.0	27.0 (días)

3.5.1 Distribución de tratamientos

Las cantidades aplicadas de inoculante y de fertilizante

* Bernard, R. U.S. Regional Soybean Laboratory. Comunicación personal.

nitrogenado y la época de aplicación de nitrógeno correspondientes a los tratamientos se ofrecen en el Cuadro 3. De acuerdo con el diseño del experimento, el número de tratamientos fue de 15 con repetición del tratamiento central y totalizando 20 unidades experimentales constituidas por cada maceta.

Cuadro 3. Combinación de factores, dosis y tratamientos.

UNIDAD EXPERIMENTAL Nº	TRATA- MIENTO Nº	INOCU- LANTE (g/kg)	FERTILIZANTE NITROGENADO (kg/ha)	EPOCA DE APLICACION NITROGENO (días)
1	1	2,0	25,0	8,0
2	2	2,0	25,0	22,0
3	3	2,0	95,0	8,0
4	4	2,0	95,0	22,0
5	5	6,0	25,0	8,0
6	6	6,0	25,0	22,0
7	7	6,0	95,0	8,0
8	8	6,0	95,0	22,0
9	9	0,6	60,0	15,0
10	10	7,4	60,0	15,0
11	11	4,0	1,0	15,0
12	12	4,0	119,0	15,0
13	13	4,0	60,0	3,0
14	14	4,0	60,0	27,0
15	15	4,0	60,0	15,0
16	15	4,0	60,0	15,0
17	15	4,0	60,0	15,0
18	15	4,0	60,0	15,0
19	15	4,0	60,0	15,0
20	15	4,0	60,0	15,0

3.6 Manejo del experimento en el invernadero

La experimentación comprendió tres fases: Fase inicial, Fase de experimentación propiamente dicha y Fase final, cada una de ellas identificadas por las labores realizadas en el período de tiempo que tuvo lugar la investigación.

3.6.1 Fase inicial de experimentación

3.6.1.1 Preparación y establecimiento del experimento

Se utilizaron macetas metálicas de aproximadamente 9,5 kg de capacidad, todas ellas se recubrieron interiormente con pintura asfáltica para impedir la oxidación y exteriormente con pintura verde para mejor presentación. En el fondo de cada maceta se colocó, aproximadamente, 1 kg de grava previamente tamizada en mallas de 7 mm y lavada; sobre esta grava se depositaron 8 kg de suelo seco al aire, tamizado y desinfectado, dejando un espacio de 2 cm entre la superficie del suelo y los bordes de la maceta.

Se efectuó la aplicación básica de todos los otros nutrimentos en solución al suelo tanto en el recipiente donde se colocó la maceta como en la parte superior de esta última. Se dejaron pasar unos días después de la aplicación para permitir un período de equilibrio entre el fertilizante y el suelo. De la misma manera, se adicionó agua procurando que tuviera humedad suficiente al efectuarse la siembra.

Antes de realizar la siembra, las semillas de soya fueron inoculadas, humedeciendo ligeramente la superficie de la misma con agua

y mezclándola inmediatamente con la cantidad requerida de inoculante de acuerdo al tratamiento respectivo. La siembra se efectuó el 3 de noviembre de 1972, sembrándose ocho semillas en forma equidistante en cada maceta identificada por el tratamiento respectivo y distribuida en forma irrestrictamente al azar en el invernadero.

3.6.2 Fase de experimentación

3.6.2.1 Desarrollo del experimento

A los cuatro días de realizada la siembra, comenzó la germinación de las semillas, a los 10 y 15 días subsiguientes se efectuaron dos raleos, dejando cuatro y dos plantas por maceta, respectivamente. En ambos raleos se tuvo el cuidado de seleccionar las plantas que ofrecieran los mejores aspectos de supervivencia y además que tuvieran uniformidad en cada maceta.

La humedad del suelo se controló mediante tensiómetros de reloj colocados en una maceta que también llevaba dos plantas; se procuró mantener la succión matricial entre 0,3 y 0,8 bares, dando de esta manera, una mejor pauta para aplicar el riego, el cual se hizo tanto por la parte superior como inferior de las macetas.

A los tres días de realizada la siembra, se procedió a aplicar el fertilizante nitrogenado en la cantidad y frecuencia de aplicación correspondiente a los niveles codificados.

3.6.2.2 Control fitosanitario

Con el propósito de controlar el ataque de

insectos, se realizó una aplicación de Ekatín en la proporción de 0,5 cc/litro, tratamiento que mantuvo el experimento en buenas condiciones fitosanitarias.

3.6.3 Fase final de experimentación

3.6.3.1 Cosecha y recolección de datos

Una vez concluido el ciclo biológico de la soya a los 75 días, se procedió a cosechar la semilla en su vaina, se contaron las vainas por maceta y por planta, se extrajeron y contaron las semillas por maceta y por planta, procediéndose luego a calcular el promedio de vainas por planta, de semillas por planta y de semillas por vaina, respectivamente.

Las vainas de las dos plantas de cada maceta, se colocaron en bolsas de papel previamente identificadas y fueron llevadas a estufa de aire forzado, por 48 horas a 75°C, luego se pesaron y se calculó el peso promedio de la vaina.

Para obtener el rendimiento de cada tratamiento, se pesó la cantidad total de semillas producidas por maceta y por corrección se uniformizaron todos los valores al 13 por ciento de humedad mediante la siguiente fórmula:

$$Pf = Pi \frac{(100 - Hi)}{(100 - Hf)}$$

donde:

Pf = peso final de la semilla en gramos ajustado al
13 por ciento de humedad

- Pi = peso inicial de la semilla en gramos (peso obtenido luego de la cosecha)
- Hi = humedad inicial en por ciento (se determinó sometiendo las semillas a un proceso de secado durante 16 horas en una estufa a 105°C)*
- Hf = humedad final o de estandarización del rendimiento igual al 13 por ciento
- 100 = constante

Posteriormente, se calculó el rendimiento promedio por planta y el peso promedio de la semilla. Con los valores de rendimiento promedio por planta se estimó el rendimiento de soya por hectárea, considerándose para tal fin una densidad de siembra de 5 cm sobre surco y de 50 cm entre surco (25) y 84 por ciento de poder germinativo de la semilla.** Según las distancias de siembra y el poder germinativo mencionados, el número de plantas por hectárea es de 336.000.

3.6.3.2 Contenido y producción de proteína cruda en la semilla

Para esta determinación, las semillas correspondientes a cada tratamiento se molieron en un molino Wiley y se determinó el contenido de nitrógeno total por el método micro-Kjeldahl

* Echandi, R. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. Comunicación personal.

** Montavon, P. & Son, Seeds. Dekalb, Illinois. Comunicación personal.

** Finchinat, A. IICA-CTEI. Comunicación personal.

de Bremer (11). El porcentaje de nitrógeno total fue multiplicado por el factor 6,25 para obtener el porcentaje de proteína cruda en la semilla. La producción de proteína cruda tanto por planta como por hectárea se obtuvo multiplicando los rendimientos de soya por planta y por hectárea, respectivamente, con los porcentajes de proteína cruda correspondientes a cada tratamiento.

3.7 Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico efectuado, corresponde al análisis estandar de una superficie de respuesta, cuyo modelo matemático fue ajustado a la siguiente ecuación:

$$Y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} + b_{11}x_{1i}^2 + b_{22}x_{2i}^2 + b_{33}x_{3i}^2 + b_{12}x_{1i}x_{2i} + b_{13}x_{1i}x_{3i} + b_{23}x_{2i}x_{3i}$$

donde:

- Y_i = rendimiento estimado o producción estimada de proteína cruda en la semilla
- x_{1i} = niveles de inoculante
- x_{2i} = niveles de nitrógeno
- x_{3i} = niveles de época de aplicación de nitrógeno
- b_0 = intersección en Y
- b_1 = coeficiente de regresión lineal para inoculante
- b_2 = coeficiente de regresión lineal para nitrógeno
- b_3 = coeficiente de regresión lineal para época de aplicación de N

- b_{11} = coeficiente de regresión cuadrática para inoculante
 b_{22} = coeficiente de regresión cuadrática para nitrógeno
 b_{33} = coeficiente de regresión cuadrática para época de aplicación de N
 b_{12} = coeficiente de regresión cuadrática mixta (inoculante y nitrógeno)
 b_{13} = coeficiente de regresión cuadrática mixta (inoculante y época de aplicación de nitrógeno)
 b_{23} = coeficiente de regresión cuadrática mixta (nitrógeno y época de aplicación de nitrógeno)

Los puntos estacionarios de cada variable de respuesta estudia da se calcularon a partir de la primera derivada de las ecuaciones de segundo orden, valores estacionarios que reemplazados en dichas ecuaciones dieron como resultado el rendimiento máximo teórico y la producción máxima teórica de proteína cruda en la semilla posibles de lograr. Para facilitar la interpretación y graficación de los efectos de los tres factores en estudio sobre las dos variables de respuesta, se estimaron las ecuaciones canónicas respectivas.

Finalmente, para detectar el grado de asociación entre componentes del rendimiento, se efectuó un análisis de correlación con las siguientes variables de respuesta: número de vainas/planta, número de semillas/planta, número de semillas/vaina, peso promedio de 100 semillas, peso promedio por vaina, rendimiento promedio/planta, porcentaje de proteína cruda en las semillas y producción total de proteína cruda en las semillas/planta.

Los resultados experimentales fueron procesados en la computadora IBM, modelo 1130 del IICA-CTEI.

4. RESULTADOS

4.1 Características físicas y químicas del suelo

Los datos obtenidos en el análisis físico y químico de las muestras de suelo se presentan en los Cuadros 1 y 2 del Apéndice; a la vez que en forma esquemática se representan en un Ecofitograma, Figura 1.

El Ecofitograma es el modelo gráfico que relaciona las características físico-químicas del suelo, condiciones ambientales externas y su importancia en el desarrollo y la productividad de la planta.

4.1.1 Densidad aparente

Los valores de densidad aparente de muestras representativas de los diferentes horizontes del perfil pueden ser considerados como indicativos de la capacidad de penetración de las raíces.

En el presente estudio, los valores obtenidos varían con la profundidad, encontrándose el mayor valor (1,25 g/cc) entre los 26 y 41 cm de profundidad, para luego disminuir a 1,10 g/cc entre los 41 y 90 cm. Sin duda, cambios en la textura, aumento en el contenido de arcilla y en el de arena respectivamente, con la consiguiente variación en el grado de compactación, son los responsables por la variación en la densidad aparente. En el momento del muestreo se pudo detectar la gran compactación existente entre los 26 y 41 cm de profundidad, respaldada por el valor arriba indicado.

4.1.2 Densidad de partículas

Los valores de densidad de partículas varían entre 2,48 y 2,57 g/cc, indicando la existencia de minerales de diferente densidad,

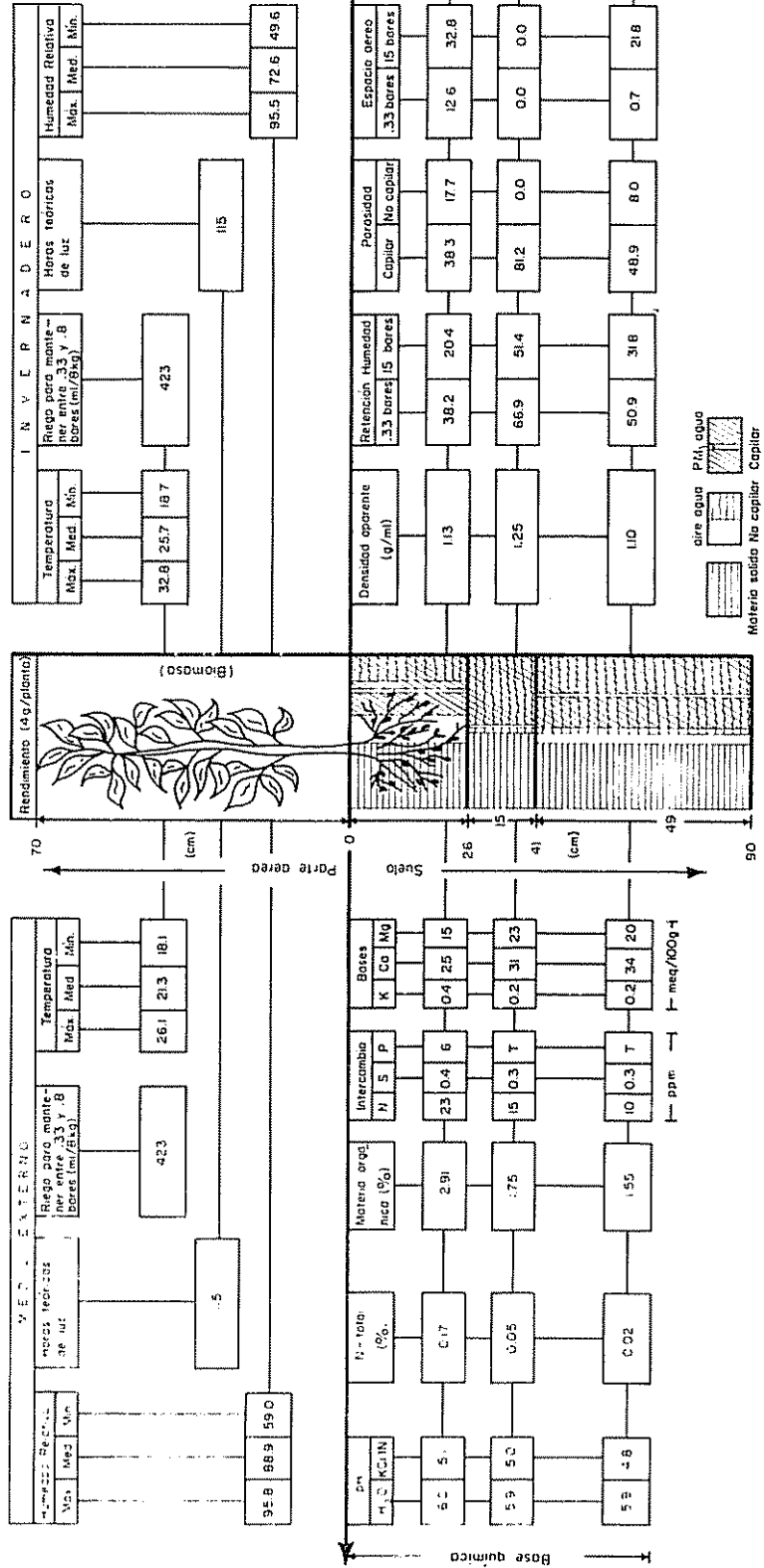


Fig. 1 Ecofisiograma ilustrando la relacion estructural entre el suelo, el medio externo y la respuesta de la planta de soya.

correspondiendo los más livianos al horizonte comprendido entre los 26 y 41 cm y los más pesados a la capa superficial (0 - 26 cm).

4.1.3 Porosidad total

Si se considera el valor de 66 por ciento como el característico de un suelo ideal, los valores encontrados para el suelo en estudio son inferiores a dicho valor y fluctúan entre 49,6 y 56,9 por ciento, correspondiendo el más bajo al horizonte de 26 a 41 cm de profundidad, que a su vez presenta el valor más alto de densidad aparente (1,25 g/cc). El valor más alto de porosidad total corresponde al horizonte de 41 a 90 cm de profundidad.

4.1.4 Porosidad capilar (Índice de textura)

Este valor puede ser considerado como un índice de la capacidad de retención de agua. En este respecto, es de notar el alto valor encontrado para el horizonte de 21 a 60 cm que es de 65, el mismo que era de esperar por el alto contenido de arcilla, como ya se indicó anteriormente. Los otros horizontes mostraron valores de 34 (0-26 cm) y 44 (41-90 cm), características de suelos con predominio de partículas en el rango de limo y arcilla, respectivamente.

4.1.5 Porosidad no capilar

Los valores de porosidad no capilar indican no solamente las dimensiones del espacio radical en los diferentes horizontes del suelo sino también las dimensiones de los espacios que permiten

el movimiento vertical de agua y el máximo grado de aeración posible cuando el suelo drena completamente.

El Ecofitograma muestra claramente la variación en la magnitud del espacio poroso no capilar en toda la profundidad del perfil, resaltando la aparente falta absoluta de aeración en el horizonte de 26 a 41 cm, mientras que en el horizonte superior (0-26 cm) tiene un valor adecuado (17,5%), y es algo crítico entre 41 y 90 cm (8,5%) de notando en este último caso, posibles deficiencias de aeración especialmente de precipitación.

Estos datos manifiestan claramente que en condiciones de campo este suelo está sujeto a serios problemas de anegamiento en época de lluvias, por la facilidad de formación de una napa freática a la profundidad de 26 cm, la misma que puede subir aún más hacia la superficie del suelo, dependiendo de la intensidad de las lluvias.

Con referencia a las propiedades químicas del suelo estudiado, esquematizadas en la Figura 1, se observa que los valores de pH se encuentran en rangos adecuados y donde el valor de 6,0 que caracteriza al pH de la capa superficial, satisface parcialmente el requerimiento para el desarrollo normal de la soya. Los valores en la solución de CLK $1N$ son menores y cuya diferencia entre ambas mediciones es de 0,9 para las tres profundidades del perfil estudiado.

De acuerdo con los patrones de comparación dados por Hardy (Cuadro 3 del Apéndice), los contenidos de materia orgánica y de nitrógeno total (2,91 y 0,17%, respectivamente) que caracterizan la capa superficial se encuentran por debajo del contenido medio siendo la relación C/N de 9,7, nivel medio. Por otra parte y como interpretación lógica,

la materia orgánica y el nitrógeno total disminuyen con la profundidad y donde las relaciones C/N incrementan, principalmente por la reducción considerable del nitrógeno total. Los valores de nitrógeno, fósforo y azufre intercambiables son bajos. La capacidad de intercambio catiónico en todas las capas del perfil estudiado se caracteriza por presentar valores elevados. Las variaciones más importantes se encuentran en el contenido de bases intercambiables donde el potasio se encuentra en un nivel medio, mientras que el calcio y el magnesio alcanzan valores altos, con una acumulación máxima (31,5 y 22,7 meq/100 g de suelo de Ca y Mg, respectivamente) entre los 26 y 41 cm de profundidad, consecuentemente las relaciones entre estos tres cationes muestran serios desbalances, especialmente donde participan el calcio y el magnesio.

4.2 Efecto de tratamientos sobre la producción de soya

Los resultados obtenidos en función de los factores en estudio: inoculación, fertilización nitrogenada y época de aplicación de nitrógeno, son presentados en el Cuadro 4. De conformidad al resultado del análisis de variancia que se presenta en el Cuadro 5 del Apéndice, se observa que los rendimientos de soya respondieron de acuerdo con la Ley del Rendimiento Decreciente.

Para apreciar con mayor claridad el efecto sobre el rendimiento de los diferentes niveles de los factores en estudio, se procedió a realizar el análisis de superficie de respuesta, siguiendo el modelo que se describe a continuación:

$$\hat{Y}_i = 4,00218 + 0,11619X_{1i} + 0,14900X_{2i} + 0,01127X_{3i} - \\ 0,71448X_{1i}^2 - 0,78518X_{2i}^2 - 0,18163X_{3i}^2 - 0,33187X_{1i}X_{2i} - \\ 0,3143X_{1i}X_{3i} + 0,11937X_{2i}X_{3i}$$

Cuadro 4. Rendimiento promedio por planta (g) y rendimiento equivalente en kg/ha.

Nº	TRATAMIENTOS			RENDIMIENTO PROMEDIO POR PLANTA (g)	RENDIMIENTO EQUIVALENTE (kg/ha)
	X ₁ (I)	X ₂ (N)	X ₃ (E)*		
1	2.0	- 25.0	- 8.00	1,735	583
2	2.0	- 25.0	- 22.0	1,255	422
3	2.0	- 95.0	- 8.0	3,000	1008
4	2.0	- 95.0	- 22.0	2,415	811
5	6.0	- 25.0	- 8.0	3,890	1307
6	6.0	- 25.0	- 22.0	1,570	528
7	6.0	- 95.0	- 8.0	3,245	1090
8	6.0	- 95.0	- 22.0	1,985	667
9	0.6	- 60.0	- 15.0	2,095	704
10	7.4	- 60.0	- 15.0	1,680	564
11	4.0	- 1.0	- 15.0	1,735	583
12	4.0	- 119.0	- 15.0	1,640	551
13	4.0	- 60.0	- 3.0	2,060	692
14	4.0	- 60.0	- 27.0	4,730	1589
15**	4.0	- 60.0	- 15.0	4,007	1345

* (I) : Inoculante (g/kg semilla)
 (N) : Nitrógeno (kg/ha)
 (E) : Época de aplicación nitrógeno (días)

** Promedio de seis tratamientos

donde:

$$\hat{Y}_i \quad : \quad \text{Rendimiento estimado (g/planta)}$$

$$X_{1i} = \left(\frac{x_{1i} - \bar{x}}{I} \right) \quad : \quad \text{Niveles de inoculante (g/kg semilla)}$$

$$X_{2i} = \left(\frac{x_{2i} - \bar{x}}{I} \right) \quad : \quad \text{Niveles de nitrógeno (kg/ha)}$$

$$X_{3i} = \left(\frac{x_{3i} - \bar{x}}{I} \right) \quad : \quad \text{Niveles de época de aplicación de nitrógeno (días)}$$

La tendencia cuadrática al ser significativa (Cuadro 5 del Apéndice) demuestra que el rendimiento no fue constante y se vio afectado en un determinado punto por ciertos niveles de inoculante, nitrógeno y época de aplicación de nitrógeno, lo que significa que existieron óptimos en los niveles de los mencionados factores. En tal circunstancia, con base en la ecuación de respuesta de segundo orden se calcularon los puntos estacionarios que correspondieron a esos niveles óptimos mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \hat{Y}_i}{\partial \hat{X}_1} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \hat{Y}_i}{\partial \hat{X}_2} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \hat{Y}_i}{\partial \hat{X}_3} = 0$$

Resolviendo simultáneamente las tres ecuaciones se estimaron las dosis que maximizan el rendimiento:

$$\hat{X}_1 = 4,10 \text{ g de inoculante/kg de semilla}$$

$$\hat{X}_2 = 62,51 \text{ kg de nitrógeno/ha}$$

$$\hat{X}_3 = 14,46 \text{ días de aplicación de nitrógeno}$$

Puesto que la segunda derivada de las ecuaciones de la función de respuesta con respecto a X_{1i} , X_{2i} y X_{3i} fueron negativas, los valores de \hat{X}_1 , \hat{X}_2 y \hat{X}_3 estimados representaron los puntos que produjeron los máximos efectos positivos.

El rendimiento máximo teórico posible de lograr con estos valores estimados es 4,101 g/planta. A partir de este punto la respuesta declinó para cualquier otra combinación de niveles de los factores en estudio. Para la representación gráfica tridimensional se transformó la ecuación de segundo grado a la forma canónica, correspondiendo dicha ecuación a la siguiente:

$$\hat{Y} - 4,101 = -0,1224Z_1^2 - 0,6352Z_2^2 - 0,9236Z_2^3$$

La anterior ecuación indica la marcada influencia de la época de aplicación de nitrógeno y de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de soya, constituyendo la época de aplicación de nitrógeno el factor más crítico. La Figura 2 muestra la configuración geométrica que adquiere el rendimiento en función de las tres variables canónicas.

4.3 Efecto de tratamientos sobre la producción de proteína cruda en la semilla

Los datos experimentales obtenidos de la producción de la proteína cruda en la semilla, dados en el Cuadro 5 y considerando que las variables en estudio afectaron dicha producción en forma cuadrática como se puede observar en el análisis de variancia presentado

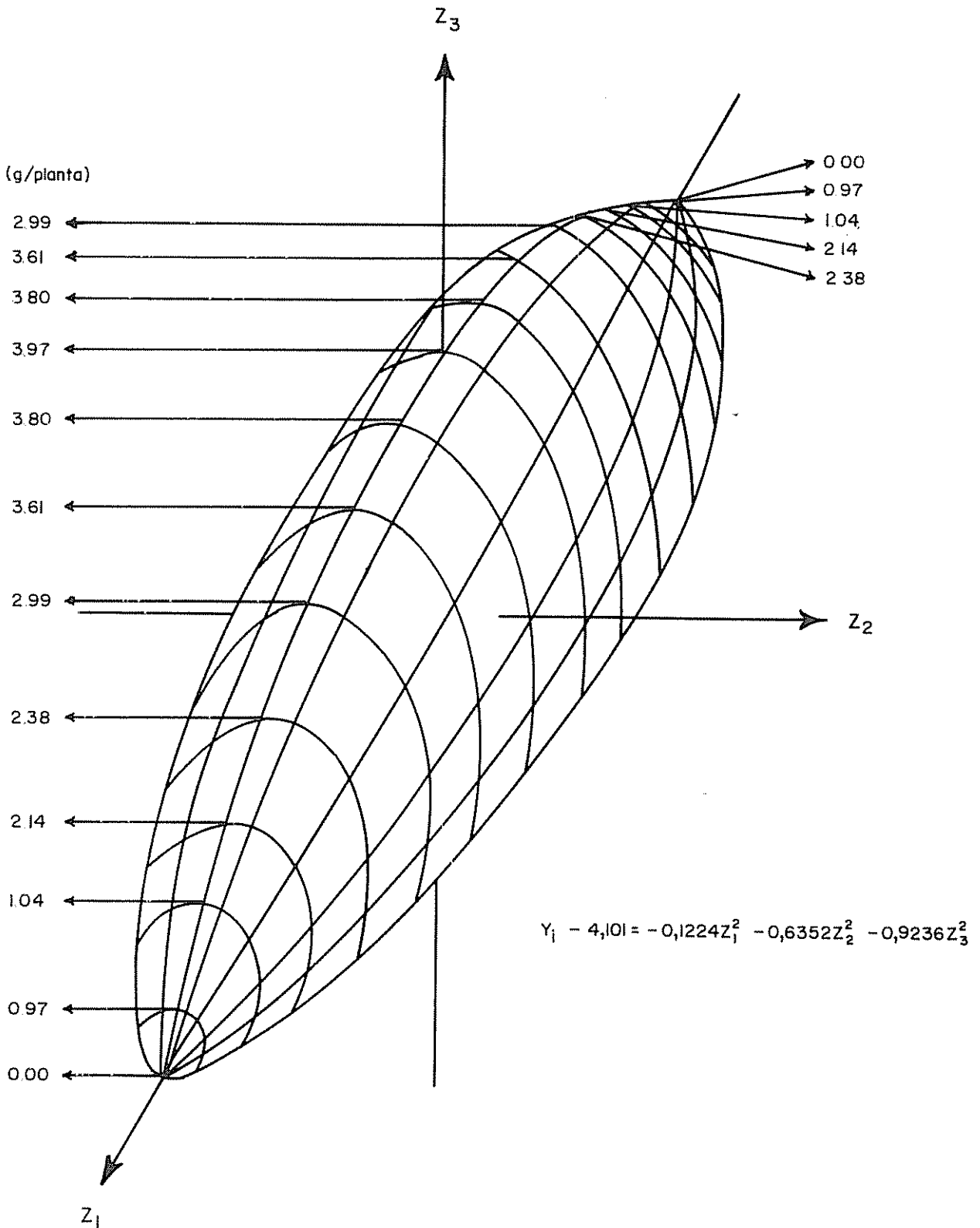


Fig 2. Configuración geométrica del rendimiento de soya de acuerdo con la transformación canónica.

Cuadro 5. Producción promedio de proteína cruda en la semilla (g)
y producción equivalente en kg/ha.

Nº	X ₁ (I)	X ₂ (N)	X ₃ (E)*	PRODUCCION PROTEINA (g/pl)	PRODUCCION EQUIVALENTE DE PROTEINA (kg/ha)
1	2.0	25.0	8.0	0,676	226,96
2	2.0	25.0	22.0	0,487	163,78
3	2.0	95.0	8.0	1,170	392,31
4	2.0	95.0	22.0	0,977	328,05
5	6.0	25.0	8.0	1,510	507,25
6	6.0	25.0	22.0	0,620	208,61
7	6.0	25.0	8.0	1,290	434,04
8	6.0	95.0	22.0	0,793	266,67
9	0.6	95.0	15.0	0,783	263,30
10	7.4	60.0	15.0	0,632	212,42
11	4.0	60.0	15.0	0,658	221,42
12	4.0	1.0	15.0	0,615	206,68
13	4.0	119.0	3.0	0,809	271,82
14	4.0	60.0	27.0	1,924	646,41
15**	4.0	60.0	15.0	1,605	538,88

* (I) : Inoculante (g/kg semilla)

(N) : Nitrógeno (kg/ha)

(E) : Epoca de aplicación nitrógeno (días)

** Promedio de seis tratamientos

en el Cuadro 6 del Apéndice, se ajustó la superficie de respuesta de segundo orden en igual forma que para el rendimiento. La ecuación cuadrática estimada tuvo la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_i &= 1,60295 + 0,04759X_{1i} + 0,06338X_{2i} + 0,0078X_{3i} - \\ &0,30071X_{1i}^2 - 0,32581X_{2i}^2 - 0,06778X_{3i}^2 - 0,12899X_{1i}X_{2i} - \\ &0,12575X_{1i}X_{3i} + 0,04850X_{2i}X_{3i} \end{aligned}$$

Al ser significativa la respuesta cuadrática la producción de proteína cruda en la semilla se vio afectada en un nivel determinado de cada factor en estudio, por tanto, con base en la ecuación de respuesta se estimaron las dosis que producen un máximo de producción de proteína. El procedimiento fue semejante al caso anterior:

$$\frac{\partial \hat{Y}_i}{\partial \hat{X}_1} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \hat{Y}_i}{\partial \hat{X}_2} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \hat{Y}_i}{\partial \hat{X}_3} = 0$$

Una vez resueltas simultáneamente las tres ecuaciones se obtuvieron los valores de inoculante, de nitrógeno y de la época de aplicación de nitrógeno que maximizan la producción de proteína cruda en la semilla:

$$\begin{aligned} \hat{X}_1 &= 4,08 \text{ g de inoculante/kg de semilla} \\ \hat{X}_2 &= 62,46 \text{ kg de nitrógeno/ha} \\ \hat{X}_3 &= 14,52 \text{ días} \end{aligned}$$

Valores estimados que dieron como resultado una producción de 1,607 g/planta de proteína cruda en la semilla. A partir de este punto la respuesta también declinó para cualquier combinación de niveles de los factores en estudio.

Con el objeto de una mejor interpretación de los efectos de los tres factores sobre la producción de proteína cruda en la semilla, la ecuación de segundo orden se transformó a la forma canónica, siendo dicha ecuación la siguiente:

$$\hat{Y}_i - 1,607 = - 0,04612Z_1^2 - 0,2676Z_2^2 - 0,3805Z_3^2$$

Al igual que en el rendimiento, la ecuación anterior indica claramente la mayor importancia de la época de aplicación de nitrógeno seguida por la fertilización nitrogenada sobre la producción de proteína cruda en la semilla. La Figura 3 muestra las variaciones de la producción de proteína cruda en la semilla en función de las variables canónicas. Como se observa, la producción de proteína llega a un máximo (1,607 g/planta) a partir del cual la producción disminuye hacia valores positivos y negativos de dichas variables. Esto implica que cuando los niveles de inoculante, nitrógeno y época de aplicación de nitrógeno se alejan de los valores que optimizan la respuesta, la producción de proteína cruda en la semilla disminuye en ambas direcciones.

La confiabilidad del modelo matemático indicó un buen ajuste en ambas ecuaciones cuadráticas, rendimiento y producción de proteína ($R^2 = 63$ y 64% , respectivamente).

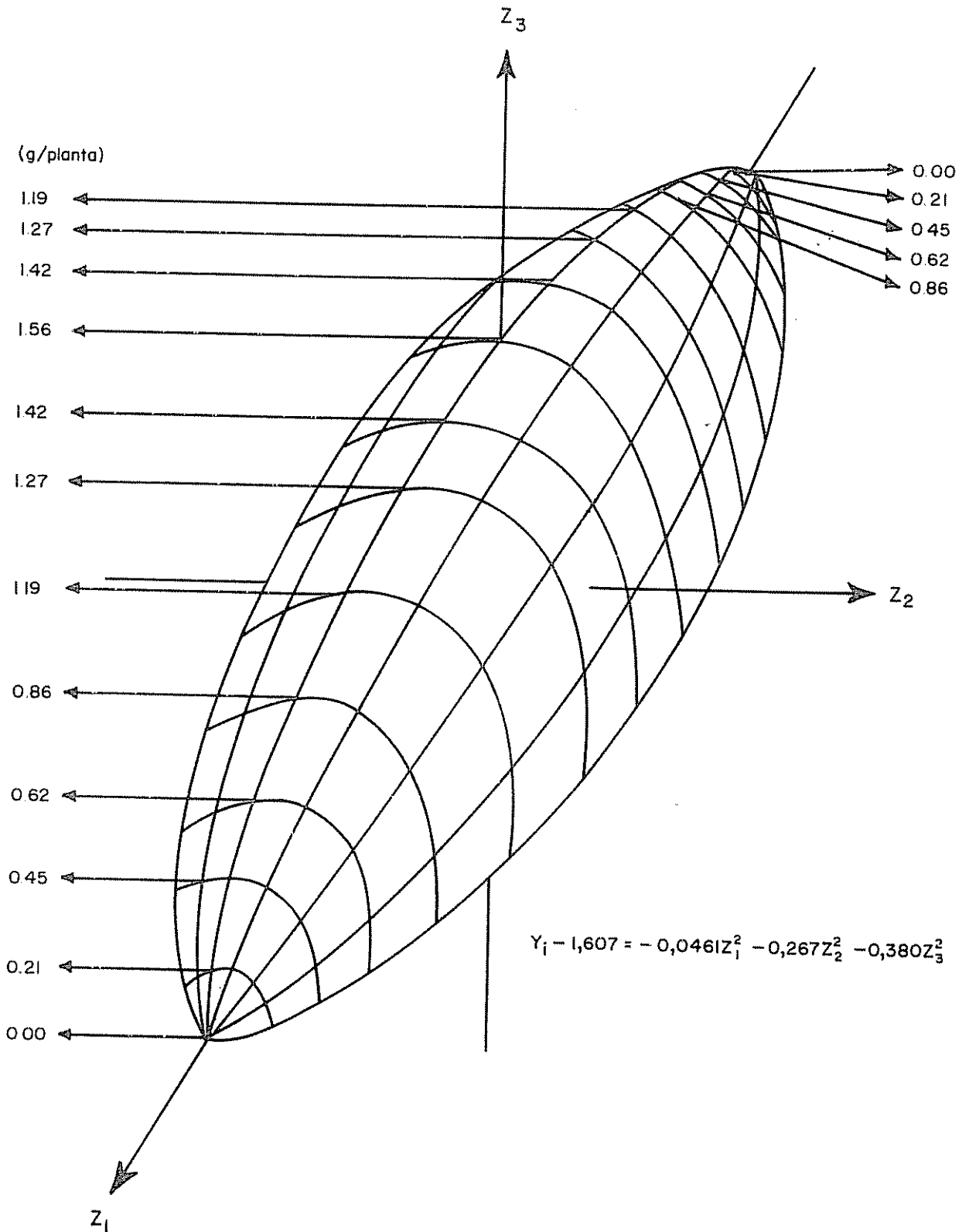


Fig. 3 Configuración geométrica de la producción de proteína cruda en la semilla de acuerdo con la transformación canónica.

4.4 Efecto de tratamientos sobre otros componentes del rendimiento

Los resultados obtenidos en el presente estudio con referencia a los efectos de la inoculación, fertilización nitrogenada y época de aplicación de nitrógeno sobre otros componentes del rendimiento, tales como: número de vainas por planta, número de semillas por planta, número de semillas por vaina, peso promedio de 100 semillas, peso promedio/vaina, rendimiento por planta, porcentaje de proteína cruda en la semilla y producción total de proteína cruda en la semilla por planta, son presentados en el Cuadro 7 del Apéndice. Las diversas asociaciones entre las variables estudiadas se muestran en el Cuadro 6, donde la matriz de correlación señala importantes asociaciones entre las cuales se puede notar que el número de vainas por planta parece estar correlacionada con todas las variables excepto con el número de semillas. Por otra parte, todas las correlaciones fueron positivas indicando que a medida que aumenta una variable la otra sigue la misma tendencia y su asociación será más importante cuanto más alto sea su valor dado (\hat{R}).

4.5 Curvas de producción

Las ecuaciones de regresión múltiple de rendimiento y de producción de proteína cruda en la semilla, pueden reducirse alterando una variable y fijando dos de ellas. Dicha reducción favorece en la construcción de curvas de producción como función de cada variable en

Cuadro 6. Matriz de correlación de las características estudiadas en soya.

$\hat{R} =$	1,00								Y_1
	0,92	1,00							Y_2
	-0,14	0,24	1,00						Y_3
	0,79	0,78	0,03	1,00					Y_4
	0,02	0,30	0,67	0,23	1,00				Y_5
	0,91	0,94	0,12	0,93	0,26	1,00			Y_6
	0,47	0,56	0,18	0,58	0,01	0,60	1,00		Y_7
	0,90	0,93	0,13	0,93	0,26	0,99	0,64	1,00	Y_8
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	

\hat{R} : Matriz de correlaciones

Y_1 : Número de vainas/planta

Y_2 : Número de semillas/planta

Y_3 : Número de semillas/vaina

Y_4 : Peso promedio de 100 semillas (g)

Y_5 : Peso promedio/vaina (g)

Y_6 : Rendimiento de grano (g)

Y_7 : Proteína cruda en la semilla (%)

Y_8 : Producción total de proteína cruda en la semilla (g)

estudio. Las Figuras 4 y 5 del Apéndice representan estas curvas de producción, donde se observa las variaciones del rendimiento y de la producción de proteína cruda en la semilla como resultado de la interacción de los tres factores entre sí.

5. DISCUSION

5.1 Ecofitograma

La introducción en el presente trabajo del Ecofitograma, que puede ser considerado como un concepto nuevo en la interpretación de las relaciones suelo-planta-medio externo, constituye en cierta manera, una ayuda para comprender la variabilidad de los factores del sistema en función de las limitaciones que estos ejercen sobre la productividad de la planta.

5.2 Propiedades físicas y químicas del suelo

Los datos obtenidos en laboratorio dan evidencia de que la densidad aparente es inferior a los promedios señalados por Hardy (28) para las diferentes profundidades del perfil estudiado; sin embargo, los valores encontrados parecen indicar cierto grado de impedimento a la penetración de las raíces y al drenaje interno, lo cual probablemente sea una consecuencia de la cantidad considerable de arcilla que presenta el suelo en todo el perfil, destacándose la sección comprendida entre los 26 y 41 cm de profundidad que presenta el valor más alto en densidad aparente, consecuencia probable de la compactación que se traduce en un aumento de dicha propiedad física. Por otra parte, al considerar las variaciones de la humedad del suelo a través del perfil estudiado, el espacio aéreo y la profundidad efectiva de raíces en soya, se observa que la aireación del suelo, a partir de los 26 cm de profundidad, se hace crítica por el hecho de que el espacio aéreo llega a la nulidad entre las succiones 0,33 y 15 bares.

Lo anterior ayuda, al menos en parte, a determinar la existencia de cierta limitación en estos suelos para el cultivo de la soya, puesto que esta leguminosa en la mayoría de los casos, responde en forma eficiente en suelos con textura franca o franco arenosa, bien aireados y donde la succión total del agua del suelo no constituye un factor limitante en la absorción de agua por la planta y lógicamente en el aprovechamiento de nutrimentos en la solución (62).

La reacción del suelo es ligeramente ácida a juzgar por los valores obtenidos y comparados con los patrones de Hardy (Cuadro 3 del Apéndice), valores que en general pueden ser considerados moderados para el cultivo de la soya. Considerando los patrones de Hardy (Cuadro 3 del Apéndice) el contenido de materia orgánica es bajo, consecuencia de esto es la baja concentración del nitrógeno total. Por otra parte y teniendo en cuenta las conclusiones del estudio realizado por Suárez (54) en el sentido de que el N-total como indicador del nitrógeno disponible para las plantas no ofrece garantía, se observa que el $N-NH_4^+$ intercambiable determinado indica una posible deficiencia de nitrógeno asequible a las plantas.

La relación C/N de la capa superficial queda comprendida dentro los límites adecuados según el patrón de comparación de Hardy (Cuadro 3 del Apéndice), relación que aumenta con la profundidad, siendo la causa probable la reducción considerable del nitrógeno total. De acuerdo con la escala de Navas et al (38), el contenido de fósforo aprovechable extraído por el método de Bray-Kurtz 1 (10) es bajo, posiblemente por el hecho de que el fósforo se halla precipitado con

las formas cálcicas ya que el fósforo apatítico determinado indica tal situación.

El contenido de azufre asequible en la capa superficial puede ser considerado en concentración baja (0,4 ppm), puesto que resultados preliminares obtenidos por Blasco* indican que cuando se emplean fosfatos de calcio para extraer S-asequible, 30 ppm o menos, pueden considerarse como concentraciones bajas, 30-45 ppm se consideran como concentraciones medias y por encima de 45-50 ppm no hay respuesta a la aplicación de fertilizantes azufrados.

La capacidad de intercambio catiónico se caracteriza por presentar valores elevados en todo el perfil estudiado, aspecto que estaría directamente relacionado con la capacidad retentiva de bases por parte de los coloides del suelo. Asimismo, comparando los resultados obtenidos con los patrones de Hardy (Cuadro 3 del Apéndice) se observa que el potasio es medio y el calcio y magnesio altos. El contenido elevado de calcio y magnesio se debe, probablemente, a una retención considerable por parte de los coloides del suelo y a los posibles problemas existentes en la poca lixiviación o drenaje, consecuentemente se observa que la relación Ca/Mg es baja principalmente por el contenido elevado de magnesio, Mg/K es alta y la relación Ca+Mg/K también alta, lo que determinaría la existencia de serios desbalances entre estos tres cationes.

* Blasco L., M. Comunicación personal.

5.3 Rendimiento y producción de proteína cruda en la semilla

Los resultados obtenidos en el experimento indican que el rendimiento en grano y la producción de proteína cruda en la semilla de soya constituyen los efectos de la interacción entre inoculación, fertilización nitrogenada y época de aplicación de nitrógeno, hecho que reafirma el postulado de que la práctica combinada de inoculación y fertilización nitrogenada es necesaria para obtener óptimos rendimientos en soya (18, 19, 55, 61).

La acción conjunta y positiva del nitrógeno combinado (N-simbiótico y N-fertilizante) y época de aplicación de este elemento sobre el rendimiento y producción de proteína cruda en la semilla de soya observada en el presente estudio, estableció un punto máximo, a partir del cual el comportamiento de los tres factores fue similar en el sentido de afectar negativamente sobre las dos variables de respuesta. Yoshihara y Kawankee (42) confirman lo anterior al indicar que existe incremento en el rendimiento de soya cuando las plantas reciben una fertilización nitrogenada durante la primera etapa de su desarrollo y no una adición posterior a la floración. En tales circunstancias, es probable que en las condiciones del experimento, el rendimiento y la producción de proteína cruda en la semilla, obtenidos por la interacción de 4 g de inoculante por kg de semilla y 62,5 kg de nitrógeno por hectárea aplicados a los 14,5 días después de la siembra, están relacionados con la cantidad de nitrógeno disponible durante el período de floración, lo cual concuerda con lo sostenido por Lathwell y

Evans (42), quienes indican la importancia de la disponibilidad del nitrógeno en la primera etapa del desarrollo de las plantas para obtener máximos rendimientos en soya. A la vez esto permite deducir que la época de aplicación del fertilizante nitrogenado en soya constituye un factor importante en la efectiva utilización del nitrógeno por parte de las plantas, aspecto que remarcan las conclusiones del estudio realizado por Lyons y Early (35) al señalar que la adición de nitrógeno durante la etapa inicial de desarrollo es beneficiosa al suplir la demanda considerable de nitrógeno.

Considerando los efectos de las dosis altas de inoculante (mayores a 4 g/kg de semilla), se ha observado una reducción considerable tanto en el rendimiento como en la producción de proteína cruda en la semilla. Ello permite establecer que la asociación benéfica mútua entre bacteria y planta se vio afectada probablemente por un proceso inhibitorio del nitrógeno mineral proveniente de la fertilización. En este aspecto debe tenerse en cuenta lo anotado por Weber (59), Streuber (53) y Vincent (57), según lo cual la causa principal del efecto inhibitorio de la nodulación y, por ende, la disminución en la actividad bacterial para fijar nitrógeno atmosférico, constituye el incremento gradual de la fertilización nitrogenada. Sin embargo, si bien la nodulación disminuye a medida que aumenta la cantidad de nitrógeno, hasta cierto nivel la fertilización nitrogenada aumenta económicamente los rendimientos en la producción de soya (12), comportamiento similar observado con el nivel de 62,5 kg/ha en los resultados obtenidos.

En contraste con lo establecido por Nelson (39), en el sentido de que la adición de nitrógeno rara vez produce una respuesta económica en la producción de soya por el hecho de que la bacteria Rhizobium japonicum suministra, por medio de la fijación simbiótica, cantidades adecuadas de nitrógeno para obtener rendimientos satisfactorios, se ha demostrado en el presente estudio que la fijación simbiótica de nitrógeno por parte de la bacteria no es suficiente para poder producir los más altos rendimientos posibles, puesto que una interacción de nitrógeno combinado, en un nivel dado y en un tiempo determinado, provocó la maximización del rendimiento y la producción de la proteína cruda en la semilla. Las conclusiones de Allos y Bartholomew (3) coadyuban en este sentido al indicar que solamente alrededor de 50 a 75 por ciento del nitrógeno total requerido para rendimientos máximos debe ser suministrado por procesos de fijación, debiendo completarse dicho requerimiento con una fertilización nitrogenada.

Al estudiar los efectos positivos y negativos de la inoculación, fertilización nitrogenada y época de aplicación de nitrógeno sobre las variables de respuesta mencionadas en los objetivos del presente estudio, es menester aclarar que el efecto del fotoperíodo, sobre el desarrollo de las plantas de soya y particularmente sobre la floración, fue considerado como factor de crecimiento constante y no limitante con el propósito de poder interpretar con mayor claridad los problemas de interacción entre inoculante y fertilizante. Sin embargo, se observó que las plantas de soya florecieron antes de los 30 días después de la siembra y maduraron a los 75 días, acortándose de

esta manera, el ciclo biológico de la soya, aspecto que concuerda con lo enunciado por Echandi (16) quien sostiene que al sembrar en los trópicos, cultivares provenientes de latitudes no tropicales, las plantas florecen a menudo 30 días después de la siembra dando como resultado rendimientos bajos, es decir, que los días cortos reducen el tiempo de floración y por tanto acortan el ciclo de vida de la planta. Por otra parte, observando las horas teóricas de sol para la latitud 10°N Norte (16), se tiene como valor mínimo 11.5 horas de período de luz que corresponde a los meses de noviembre, diciembre y enero, tiempo abarcado por la parte experimental del presente trabajo. Como corolario de lo anteriormente expuesto, se desprende que los rendimientos obtenidos un tanto bajos sean en parte una consecuencia del efecto del fotoperíodo, siendo recomendable considerar dicho factor en futuros trabajos.

5.4 Otros componentes del rendimiento

Con referencia al efecto de los tratamientos sobre otros componentes del rendimiento, los datos sobre el número de vainas por planta muestran que esta característica fue poco influida por los factores en estudio. Sin embargo, la alta correlación encontrada de esta variable con el número de semillas por planta, peso de 100 semillas, rendimiento y producción de proteína cruda en la semilla, podría considerarse como un índice de altos rendimientos de soya.

El número de semillas por planta y por vaina varió muy poco bajo efecto de los tratamientos, situación que podría explicarse en

el sentido de que el número de semillas por planta y por vaina constituyen una característica genética que no se altera con la inoculación y la fertilización nitrogenada. A pesar de la poca influencia de los tratamientos sobre el número de semillas por planta y por vaina, hubo alta correlación de estas variables con el rendimiento, la producción de proteína cruda en la semilla y el peso promedio de la vaina.

Respecto a la asociación positiva y directa del peso de 100 semillas con el rendimiento y la producción de proteína cruda en la semilla, se encontró, concordando con lo establecido por Weber (60), y Johnson, Robinson y Comstock (31), que el peso de 100 semillas constituye una variable de respuesta sensible dentro las características cuantitativas del rendimiento.

El efecto estimulante del N-combinado observado en el presente estudio, determinó una asociación positiva y directa entre el rendimiento, porcentaje y producción de proteína cruda en la semilla de soya, lo cual podría interpretarse en el sentido de que a medida que aumentó el rendimiento de soya, mejoró la calidad de la proteína y aumentó la producción de proteína cruda en la semilla. Relación directa generalmente aceptada (23).

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten presentar las siguientes conclusiones:

1. Los factores críticos de la base física y química del perfil del suelo estudiado, que afectan la productividad de la planta, constituyen la densidad aparente, la capacidad de aireación, el contenido de bases cambiables y la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y azufre.
2. Los factores arriba indicados se representan gráficamente en un Ecofitograma, que puede ser considerado como un nuevo concepto de interpretación de las relaciones suelo-planta-medio externo que permite la comprensión de las propiedades en dicho sistema.
3. El rendimiento y la producción de proteína cruda en la semilla de soya, respondieron de acuerdo con la Ley del Rendimiento Decreciente, lo que implica la existencia de puntos críticos en la aplicación de insumos.
4. La práctica combinada de inoculación y fertilización nitrogenada es necesaria para obtener óptimos rendimientos en soya y el tratamiento que maximiza las respuestas está alrededor de 4 g de inoculante por kg de semilla, 62 kg de nitrógeno por hectárea y 14-15 días como época de aplicación de nitrógeno.
5. La fertilización nitrogenada por encima del nivel de nitrógeno que favorece la obtención de óptimos rendimientos,

puede constituir un factor negativo en la actividad bacteriana y por ende en la fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico.

6. El peso de 100 semillas constituyó una variable de respuesta sensible a los tratamientos, debiendo considerársele dentro las características cuantitativas del rendimiento.

7. RESUMEN

Se estudió el efecto de la inoculación, fertilización nitrogenada y época de aplicación de nitrógeno sobre la producción de soya (Glycine max (L) Merrill), variedad Hark en un invernadero del IICA-CTEI, Turrialba, Costa Rica. El suelo utilizado en el ensayo corresponde al horizonte superficial colectado en las cercanías del municipio de Santa Cruz (Guanacaste, Costa Rica), zona que ecológicamente pertenece al bosque tropical seco. El suelo se colocó en macetas con capacidad aproximada de 9,5 kg, donde se sembraron las semillas de soya previamente inoculadas de acuerdo a los tratamientos.

Se usó un diseño experimental de superficie de respuesta con arreglo de composición central y rotatable de la forma $2^3 + 3 \times 2 + 6$, constituyendo los factores estudiados: Inoculación, fertilización nitrogenada y época de aplicación de nitrógeno. Como inoculante se empleó el producto comercial "Nitragin" y como fertilizante nitrogenado nitrato de amonio (33,5%), habiéndose realizado una aplicación básica de los demás nutrimentos.

La introducción del Ecofitograma como un nuevo concepto en la interpretación del sistema suelo-planta-medio externo, facilita la comprensión de la variabilidad del sistema y el ordenamiento de los factores críticos en la productividad de la planta. En el presente trabajo, los factores críticos constituyeron la densidad aparente, la capacidad de aeración, el contenido de bases cambiables y la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y azufre.

El estudio demostró que tanto el rendimiento como la producción

de proteína cruda en la semilla de soya, respondieron de acuerdo con la Ley del Rendimiento Decreciente, habiéndose obtenido la maximización de ambas variables de respuesta con los niveles de 4,1 g de inoculante por kg de semilla, 62,5 kg de nitrógeno por hectárea y 14 a 15 días como época de aplicación de nitrógeno. Finalmente, se demostró que el peso de 100 semillas constituyó una variable de respuesta sensible a los tratamientos.¹¹

7a. SUMMARY

The present investigation was carried out under greenhouse conditions at IICA-CTEI, Turrialba, Costa Rica, to study the effect of inoculum and levels and time of nitrogen application on soybean production (Glycine max (L) Merrill) var. Hark.

Soil for the experiment was taken from the top 20 cm from Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. The area is considered ecologically as dry forest.

In the greenhouse, 9,5 kg capacity pots were used; soybean seeds were inoculated with Nitragin previous to planting and nitrogen applied as ammonium nitrate (33,5%N) at different times, in accordance with specified treatments. A response surface design was employed.

In assessing the main soil limiting factors controlling yield a new method of interpretation called "Ecofitograma" is presented which shows the importance of factors, such as soil bulk density, soil aeration, exchangeable cations and available nitrogen, phosphorus and sulphur in interpreting plant growth.

The experimental data showed that grain yields as well as crude protein production in soybean seeds followed the Law of Diminishing Returns. Maximum responses were obtained at the levels of 4,1 g inoculum/kg of seed, 62,5 kg nitrogen/ha and when nitrogen was applied at 14-15 days after germination. Dry weight of 100 seeds appeared to be a variable which represented the treatment effects.

8. LITERATURA CITADA

1. ABEL, G. H. y ERDMAN, L. V. Response of Lee soybeans to different strains of Rhizobium japonicum, Agronomy Journal 56(4):423-424. 1964.
2. ABU-SHAKRA, S. y BASSIRI, A. Effect of inoculation and nitrogen fertilization on nodulation, seed yield and quality of soya beans. Journal of Agricultural Science 78:179-182. 1972.
3. ALLOS, H. F. y BARTHOLOMEW, W. V. Replacement of symbiotic fixation by available nitrogen. Soil Science 87(2):61-66. 1959.
4. ARRUDA, N. B. DE, DOBEREINER, J. y GERMER, C. Inoculação nitrogenada e reestamento calcáreo em tres variedades de soja. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 3:201-205. 1968.
5. BEARD, B. H. y HOOVER, R. M. Effect of nitrogen on nodulation and yield of irrigated soybeans. Agronomy Journal 63(5): 815-816. 1971.
6. BLAKE, G. R. Particle density. In Black, C. A. et al., eds. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 374-390.
7. BLASCO, M. Curso de microbiología de suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1970. pp. 148-157.
8. BOUYOUCOS, C. J. Recalibration of hydrometer methods for making mechanical analysis of soil. Agronomy Journal 43(9): 434-438. 1951.
9. BOWER, C. A. et al. Exchangeable cation analysis of saline alkaline soil. Soil Science 73(4):251-261. 1952.
10. BRAY, R. H. y KURTZ, L. T. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science 59(1): 39-45. 1945.
11. BREMMER, J. M. Total nitrogen. In Black, C. A. et al., eds. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 1171-1175.
12. CHACON, M. E. Investigación sobre fertilización nitrogenada e inoculación en frijoles. Tesis Ing. Agr. San José, Costa Rica, Universidad, Facultad de Agronomía, 1961. 72 p.

13. CHAUDRY, I. A. y CORNFIELD, A. H. The determination of total sulphur in soil and plant material. *Analyst* 91(1085):528-530. 1966.
14. CHESNEY, H. A., KHAN, M. A. y BISESSAR, S. Performance of soybeans in Guyana as affected by inoculum (Rhizobium japonicum) and nitrogen. Mon Repos, Guyana. Ministry of Agriculture, Central Agricultural Station. 1971. 11 p.
15. DIAZ-ROMEU, R. y BALERDI, F. Determinación de la capacidad de intercambio de cationes del suelo. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1967. 3 p.
16. ECHANDI Z., R. Influencia de la longitud del día en el comportamiento de germoplasma de soya (Glycine max (L) Merrill). San José, Costa Rica, Universidad, Facultad de Agronomía, 1969. 6 p.
17. FORSYTHE, W. M. Manual de laboratorio de física de suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 216 p.
18. GARCIA, A. y MONCADA, J. La fertilización nitrogenada e inoculación como factores determinantes en el rendimiento de soya en la región de Delicias. *Agricultura Técnica en México* 2(12):554-556. 1970.
19. GHORASHY, S. R., NIKNEJAD, M. y KHERADNAM, M. Effect of planting date, nitrogen fertilization and inoculation on the yield of soybean in Iran. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 42(2):127-129. 1972.
20. GIBSON, A. H. y NUTMAN, P. S. Studies on the physiology of nodule formation. VII. A reappraisal of the effect of preplanting. *Annals of Botany* 24(96):420-433. 1960.
21. GONZALEZ, R. Investigación sobre frijol de soja en Cañas, Guanacaste. *Revista Agropecuaria (Costa Rica)* no 7:49-53. 1972.
22. GUEDEZ, A. H. Respuesta relativa de la soya y el frijol a la aplicación de nutrimentos en un suelo de la serie valle bajo en condiciones de invernadero. *Acta Agronómica (Colombia)* 10(3-4):305-329. 1960.
23. GUTIERREZ, R. D. Contenido de aceite y proteína y respuesta al abonamiento de ocho variedades de soya. *Acta Agronómica (Colombia)* 5(4):211-221. 1955.

24. HAGHIRI, F. Influence of macronutrient elements on the amino acid composition of soybean plants. *Agronomy Journal* 58(6): 609-612. 1966.
25. HANWAY, J. y THOMPSON, H. How a soybean plant develops. Iowa State University, Special Report 53. 1971. 17 p.
26. _____ y WEBER, C. R. Dry matter accumulation in soybean (*Glycine max* (L) Merrill) plants as influenced by N, P and K fertilization. *Agronomy Journal* 63(2):263-266. 1971.
27. HOWELL, R. W. Physiology of the soybean. In Norman, A. G. ed. *The soybean*. New York, Academic Press, 1963. pp. 83-88.
28. HARDY, F. *Edafología tropical*. México, D. F., Herrero, 1970. 416 p.
29. HARPER, J. y COOPER, R. Nodulation response of soybeans (*Glycine max* (L) Merrill) to application rate and placement of combined nitrogen. *Crop Science* 11(3):438-440. 1971.
30. HARRIS, S., NEUMANN, A. y STOUSE, P. The major soil zones of Costa Rica. *Soil Science* 112(6):439-447. 1971.
31. JOHNSON, H. W., ROBINSON, H. F. y COMSTOCK, R. E. Genotypic and phenotypic correlations in soybeans and their implications in selection. *Agronomy Journal* 47(10):477-483. 1955.
32. _____, MEANS, U. M. y WEBER, C. R. Competition for nodule sites between strains of *Rhizobium japonicum* applied as inoculum and strains in the soil. *Agronomy Journal* 57(2): 179-185. 1965.
33. KAPUSTA, G. Nitrogen increases soybean yields on light soils. *Crops and Soils* 23(5):26. 1971.
34. LIN, K. y LIAN, S. A report on the optimum nitrogen-phosphorus-potassium ratio for soybean. *Agricultural Research Taiwan* 11(2):12-19. 1962.
35. LYONS, J. C. y EARLEY, E. B. The effect of ammonium nitrate applications to field soils on nodulation, seed yield, and nitrogen and oil content of the seed of soybeans. *Soil Science Society of American Proceedings* 16(3):259-263. 1952.

36. MacCONNELL, J. T. y BOND, G. A comparison of effect of combined nitrogen on nodulation in non legumes and legumes. *Plant and Soil* 8(4):378-388. 1957.
37. MARTINI, J. A. Caracterización del estado nutricional de los principales "Latosoles" de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero. *Turrialba (Costa Rica)* 19(4):394-408. 1969.
38. NAVAS, J., MANZANO, H. y McCLUNG, K. Algunos aspectos del análisis de suelos. III. Calibración de análisis. *Agricultura Tropical (Colombia)* 22(6):285-294. 1966.
39. NELSON, W. L. Fertilization of soybeans. *Oleagineux* 26(2): 101-106. 1971.
40. NEUNYLOV, B. A. y SLABKO, Yu. I. Utilization of soybean of fertilizer nitrogen applied at different times. *Soils and Fertilizers* 32(3):1969.
41. NORMAN, A. G. y KRAMPITZ, L. O. The nitrogen nutrition of soybean. II. Effect of available soil nitrogen on growth and nitrogen fixation. *Soil Science Society of American Proceedings* 10:191-196. 1945.
42. _____ ed. The soybean. New York, Academic Press, 1963. pp. 128-131.
43. ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION. Guía para la descripción de perfiles de suelos. Roma, 1968. 60 p.
44. PEECH, M. Hydrogen-ion activity. In Black, C. A. et al., eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 913-926.
45. RAGGIO, M., RAGGIO, N. y TORREY, J. G. The nodulation of isolated leguminous roots. *American Journal of Botany* 44(4): 325-334. 1957.
46. _____ y RAGGIO, N. Root nodules. *Annual Review of Plant Physiology* 13:109-128. 1962.
47. RATNER, Ye. I. y SAMOYLOVA, S. A. Mineral nitrogen and nitrogen fixation in soybean in relation to the growth of nodules and phosphorus metabolism in them. *Soviet Soil Science* 3(5): 531-538. 1971.

48. RICHARDS, L. A. Physical condition of water in soil. In Black, C. A. et al., eds. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 128-152.
49. SAIZ DEL RIO, J. F. y BORNEMISZA, E. Análisis químico de suelos; métodos de laboratorio para diagnósticos de fertilidad. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1961. 107 p.
50. SCHREVEN, D. A. VAN. Some factors affecting the uptake of nitrogen by legumes. In Hallswarth, E. G. ed. Nutrition of the legumes. London, Butterworths, 1958. pp. 137-163.
51. SINGH, V. y SINGH, J. Effect of spacing, nitrogen and phosphorus levels on yield of protein content of soybean. Madras Agriculture Journal 55:129-133. 1968.
52. SMITH, R. L., HUTTON, C. E. y ROBERTSON, W. K. The effect of nitrogen on the yield of soybean. Soil and Crop Science Society of Florida 28:18-23. 1969.
53. STREUBER, E. Problems of inoculation and nitrogen fertilizing of soybean. Soils and Fertilizers 31(3):263. 1968.
54. SUAREZ, M. J. Estudio de las fracciones y volatilización del nitrógeno en dos suelos de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 81 p.
55. THORNTON, G. D. Greenhouse studies of nitrogen fertilization of soybean and lespedeza using isotopic nitrogen. Soil Science Society of American Proceedings 11:249-251. 1946.
56. TRIGOSO, R. Algunos factores que afectan la fijación simbiótica del nitrógeno. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1970. 143 p.
57. VINCENT, J. M. Environmental factors in the fixation of nitrogen by legumes. In Bartholomew, W. V. y Clark, F. I. Soil nitrogen. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 404-408.
58. WALKER, W. M. y LONG, O. H. Effect of selected soil fertility parameters on soybean yields. Agronomy Journal 58(4):403-405. 1966.
59. WEBER, C. R. y MOORTHY, B. R. Heritable and non-heritable relationships and variability of soil content and agronomic characters in F₂ generation of soybean crosses. Agronomy Journal 44(4):202-209. 1952.

60. WEBER, C. R. Nodulating and no-nodulating soybean isolines. II. Response to applied nitrogen and modified soil conditions. *Agronomy Journal* 58(1):46-49. 1966.
61. WEISS, M. G. Soybeans. *Advances in Agronomy* 1:76-157. 1949.
62. WHITE, R. O. et al. Las leguminosas en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Estudios agropecuarios* no. 25. 1955. 405 p.
63. YOSHIDA, S. y YATDZAWA, M. The effect of combined nitrogen on nodules formation in soybean seedling. *Soils and Fertilizers* 31(1):43. 1968.

A P E N D I C E

Cuadro 1. Características físicas del suelo en estudio
(Santa Cruz, Guanacaste).*

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	P R O F U N D I D A D (cm)		
	0 - 26	26 - 41	41 - 90
1. Densidad aparente (g/cc)	1,13	1,25	1,10
2. Densidad de partículas (g/cc)	2,57	2,48	2,56
3. Distribución de partículas (%)			
Arena	21,60	8,30	32,20
Limo	32,00	11,20	19,70
Arcilla	46,40	80,50	48,10
4. Clase textural	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa
5. Retención de humedad (%)			
0,10 bares	47,00	72,70	58,90
0,33 bares	38,20	66,90	50,90
0,50 bares	35,50	65,00	48,20
1,00 bares	32,00	61,90	44,30
5,00 bares	24,50	55,40	36,40
10,00 bares	21,80	52,80	33,40
15,00 bares	20,40	51,40	31,80
6. Humedad volumétrica (cc agua/100 cc suelo)			
0,10 bares	53,30	90,80	65,00
0,33 bares	43,20	83,60	56,00
15,00 bares	23,10	64,20	35,10
7. Porosidad Total (%)	56,00	49,60	56,90
8. Espacio aéreo (%)			
0,10 bares	2,60	0,00	0,00
0,33 bares	12,80	0,00	0,90
15,00 bares	33,00	0,00	21,80
9. Agua disponible (%) (0,33 y 15,00 bares)	17,80	15,50	19,10
10. Agua fácilmente disponible (%) (0,33 y 15,00 bares)	13,70	11,50	14,50

* Valores promedios de muestras duplicadas y en base a muestra secada al horno.

Cuadro 2. Características químicas del suelo en estudio
(Santa Cruz, Guanacaste).*

CARACTERISTICAS QUIMICAS	P R O F U N D I D A D (cm)		
	0 - 26	26 - 41	41 - 90
1. Reacción del suelo (pH)			
pH (H ₂ O) (1:1)	6,00	5,90	5,90
pH (KC1 1N) (1:1)	5,10	5,00	4,80
2. Materia orgánica (%)	2,91	1,75	1,55
3. Carbono orgánico (%)	1,68	1,01	0,89
4. Nitrógeno total (%)	0,17	0,05	0,02
5. C/N	9,80	20,20	44,50
6. Nitrógeno intercambiable (ppm)	23,00	14,60	10,40
7. Azufre extraíble (ppm)	0,42	0,33	0,32
8. Fósforo disponible (ppm)	6,50	T	T
9. Fósforo apatítico (ppm)	182,00	30,00	22,50
10. Bases cambiables (meq/100 g)			
Potasio	0,35	0,17	0,23
Calcio	25,50	31,00	34,20
Magnesio	14,80	22,70	19,80
11. Relaciones:			
Ca/Mg	1,72	1,38	1,71
Mg/K	42,20	133,50	86,00
Ca + Mg/K	115,10	319,00	235,00
12. Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g)	65,10	78,20	69,50

* Valores promedios de muestras duplicadas y en base a muestra secada al horno.

T = Trazas

Cuadro 3. Estandar provisional de comparación para categorías y límites adecuados.*

CARACTERISTICAS QUIMICAS	P R O F U N D I D A D (cm)					
	0 - 15			15 - 30		
	alto	medio	bajo	alto	medio	bajo
pH (H ₂ O) (relación 1:1)	7,50	6,50	5,00	7,50	6,50	5,00
Materia orgánica (%)	7,00	3,50	0,75	5,20	2,60	0,60
Nitrógeno total (%)	0,35	0,20	0,05	0,26	0,15	0,04
C/N	11,50	10,00	8,50	11,50	10,00	8,50
Fósforo disponible** (ppm)	120,00	50,00	20,00	90,00	37,00	15,00
Bases cambiables (meq/100 g)						
Calcio	24,00	12,00	4,00	18,00	9,00	3,00
Magnesio	6,00	3,00	1,00	4,50	2,30	0,80
Potasio	0,55	0,35	0,20	0,41	0,26	0,15
Relaciones						
Ca/Mg	---	4,00	---	---	4,00	---
Mg/K	---	8,00	---	---	8,00	---
Ca + Mg/K	---	40,00	---	---	40,00	---

* Tomado de: HARDY, F. The Turrialba senile latosol and its fertilizer requirements. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1962. 48 p.

** Valores para el fósforo por el método de Truog.

Cuadro 4. Valores de porosidad del suelo.

CARACTERISTICA	P R O F U N D I D A D (cm)		
	0 - 26	26 - 41	41 - 90
Masa de suelo húmedo (g)	129,15	182,35	157,95
Masa de suelo seco (g)	111,35	122,65	108,45
Diferencia (g)	17,80	59,70	49,50
Punto de adherencia (% en peso)	38,20	66,90	50,90
Contenido de arena (% en peso)	21,60	8,30	32,20
Contenido de arcilla (% en peso)	46,40	80,50	48,10
Índice de textura* (% en peso)	33,90	65,00	44,50
Densidad aparente (g/cc)	1,13	1,25	1,10
Densidad de partículas (g/cc)	2,57	2,48	2,56
Materia sólida (% en volumen)	44,10	50,40	43,10
Espacio poroso total (% en volumen)	56,00	49,60	56,90
Espacio poroso capilar** (% en volumen)	38,30	81,20	48,90
Espacio poroso no capilar*** (% en volumen)	17,70	----	8,00
Agua al momento de muestreo (% en volumen)	18,10	60,80	50,40
Aire al momento de muestreo (% en volumen)	37,80	----	6,50
Agua en espacio poroso no capilar (% en volumen)	----	----	2,00
Aire en espacio poroso no capilar (% en volumen)	17,50	----	6,50

* Índice de textura = Punto de adherencia - 1/5 arena (%)

** Espacio poroso capilar = Densidad aparente x Índice de textura

*** Espacio poroso no capilar = Espacio poroso total - Espacio poroso capilar

Cuadro 5. Análisis de variancia del efecto de los tratamientos sobre el rendimiento de soya, variedad Hark.

Fuentes de variación	G.L.	S. C.	C. M.	Fc.
Respuesta lineal	3	0,489	0,163	0,22 ns
Respuesta cuadrática pura	3	16,723	5,574	7,63**
Respuesta cuadrática mixta	3	2,462	0,820	1,12 ns
Desviación del modelo	5	4,791		
Error	5	2,512	0,730	
Total	19	26,977		

Cuadro 6. Análisis de variancia del efecto de tratamientos sobre la producción de proteína cruda en la semilla de soya, variedad Hark.

Fuentes de variación	G.L.	S. C.	C. M.	Fc.
Respuesta lineal	3	0,086	0,029	0,26 ns
Respuesta cuadrática pura	3	2,900	0,967	8,75 **
Respuesta cuadrática mixta	3	0,386	0,129	1,16 ns
Desviación del modelo	5	0,762		
Error	5	0,442	0,110	
Total	19	4,576		

** Significación 0,01

ns No significativo

Cuadro 7. Efectos de la inoculación, fertilización nitrogenada y época de aplicación de nitrógeno sobre otros componentes del rendimiento.

Nº	X ₁ (I)	X ₂ (N)	X ₃ (E)*	NUMERO DE VAINAS POR PLANTA (\bar{X})	NUMERO DE SEMILLAS POR VAINA (\bar{X})	PESO PROMEDIO 100 SEMI- LLAS (g)	PESO PROMEDIO VAINA (g)	RENDIMIENTO POR PLANTA (g)	PROTEINA CRUDA EN LA SEMI- LLA (%)	PRODUCCION DE PROTEINA CRUDA EN LA SEMILLA (g)
1	2.0 - 25 - 8			17,5	1,84	9,9	0,157	1,735	38,9	0,675
2	2.0 - 25 - 22			14,0	1,65	8,9	0,116	1,255	38,8	0,487
3	2.0 - 95 - 8			20,5	1,78	14,6	0,139	3,000	38,9	1,170
4	2.0 - 95 - 22			17,5	1,67	13,8	0,119	2,415	40,4	0,977
5	6.0 - 25 - 8			24,5	1,53	15,8	0,119	3,890	38,8	1,510
6	6.0 - 25 - 22			15,0	1,43	10,5	0,104	1,570	39,5	0,620
7	6.0 - 95 - 8			21,0	1,62	15,4	0,125	3,345	39,8	1,290
8	6.0 - 95 - 22			17,0	1,36	11,7	0,102	1,985	39,9	0,793
9	0.6 - 60 - 15			15,5	1,55	13,7	0,140	2,095	37,4	0,783
10	7.9 - 60 - 15			16,5	1,50	10,2	0,189	1,680	37,6	0,632
11	4.0 - 1 - 15			19,0	1,72	9,1	0,146	1,735	37,9	0,658
12	4.0 - 119 - 15			13,5	1,50	12,2	0,159	1,640	37,5	0,615
13	4.0 - 60 - 3			16,0	1,52	12,9	0,126	2,060	39,3	0,809
14	4.0 - 60 - 27			26,0	1,57	18,2	0,131	4,730	40,7	1,924
15*	4.0 - 60 - 15			23,9	1,67	16,7	0,148	4,007	40,0	1,605

*(I) : Inoculante (g/kg semilla)

(N) : Nitrógeno (kg/ha)

(E) : Epoca aplicación nitrógeno (días)

* : Promedio de seis tratamientos

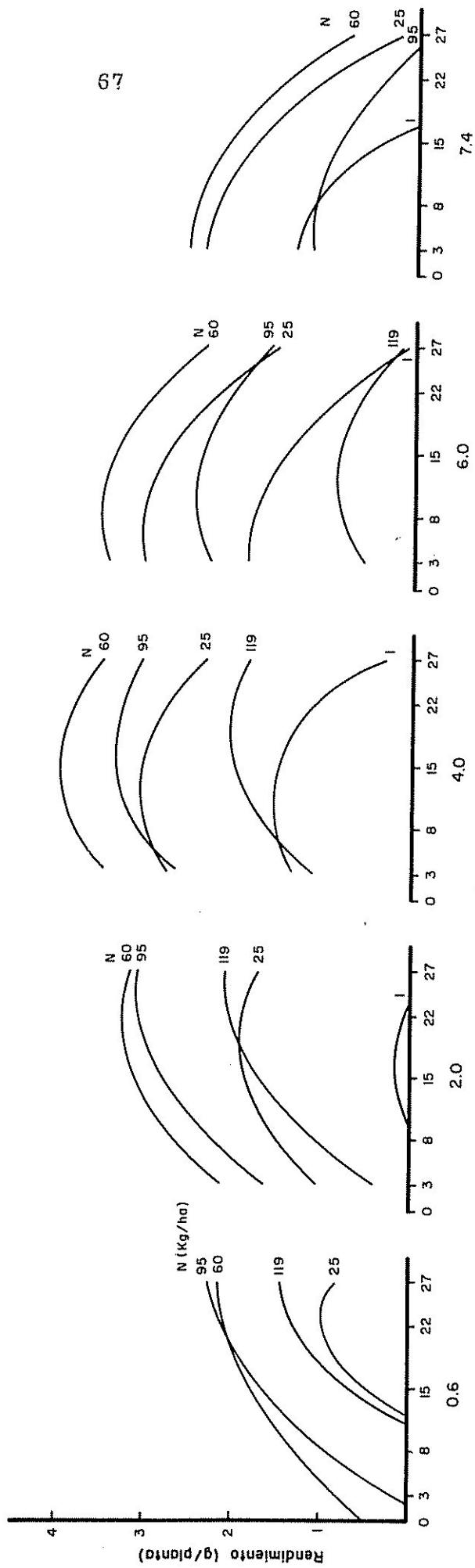


Fig. 4 Curvas de producción indicando las variaciones del rendimiento como resultado de la interacción de los tres factores en estudio.

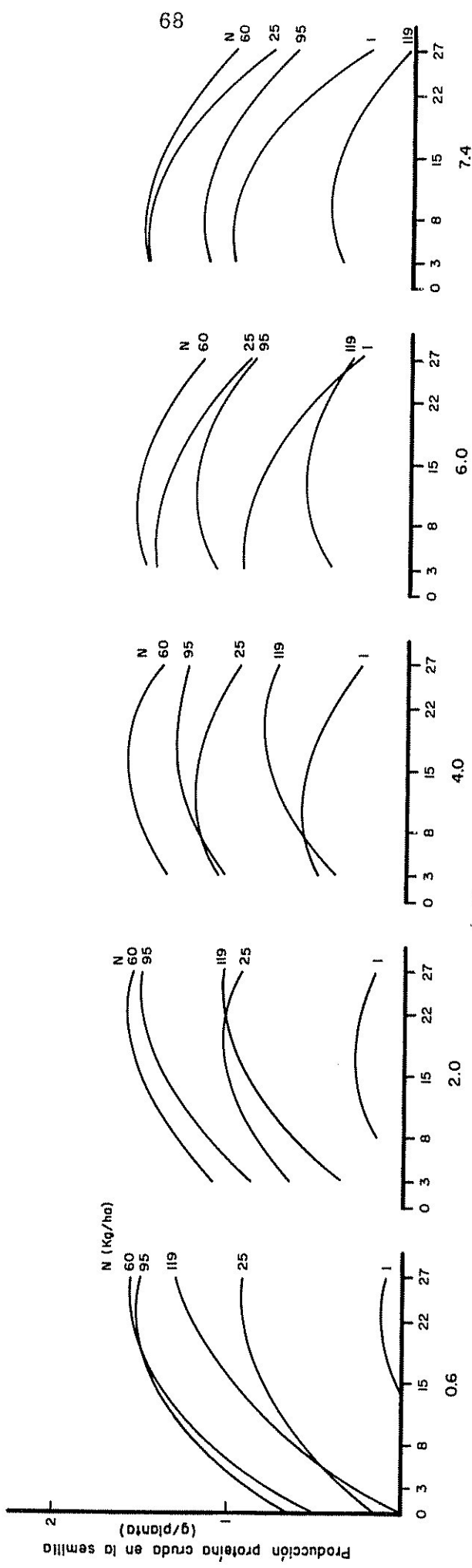


Fig. 5 Curvas de producción indicando las variaciones de la producción de proteína cruda en la semilla como resultado de la interacción de los tres factores en estudio.