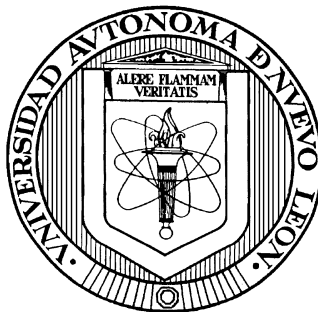


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**BALANCE NUTRIMENTAL DEL HIERRO CON RESPECTO A OTROS  
NUTRIMENTOS EN FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.).**

POR

**JOSÉ LUIS LARA MIRELES**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS  
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO**

Marín, N. L.

Febrero del 2006

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



## BALANCE NUTRIMENTAL DEL HIERRO CON RESPECTO A OTROS NUTRIMENTOS EN FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.).

POR

JOSÉ LUIS LARA MIRELES

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS  
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO

Marín, N. L.

Febrero del 2006

**BALANCE NUTRIMENTAL DEL HIERRO CON RESPECTO A OTROS  
NUTRIMENTOS EN FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Aprobación de la Tesis:

---

**Ph.D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado**  
Asesor de la Tesis

---

**Ph.D. Emilio Olivares Sáenz**  
Coasesor

---

**D. Cs. Juan Francisco Pissani Zúñiga**  
Coasesor

---

**Ph.D. Eduardo A. Narro Farías**  
Coasesor

---

**Ph.D. Manuel Ortega Escobar**  
Coasesor

---

**Ph. D. Humberto Ibarra Gil**  
Subdirector de Estudios de Posgrado de la Facultad de Agronomía  
Universidad Autónoma de Nuevo León

Marín, N.L.

Febrero del 2006

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Agronomía de la UASLP, por otorgarme las facilidades tanto en tiempo, como económicas para la realización de mis estudios de doctorado.

A la Facultad de Agronomía de la UANL, por abrirme sus puertas y los conocimientos adquiridos en ella.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para la realización de mis estudios.

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP), por el apoyo otorgado para la obtención del grado.

Al Centro de Investigaciones Agropecuarias de la Facultad de Agronomía de la UANL (CIA) por permitirme el uso de su equipo y su invaluable ayuda en el desarrollo de este estudio.

Al Ph.D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado, por la excelente dirección de este trabajo de tesis, su gran apoyo y el tiempo dedicado a la presente investigación y sobre todo por su amistad.

Al Ph.D. Emilio Olivares Sáenz, por su entusiasta participación en el presente trabajo, así como sus conocimientos transmitidos como maestro y asesor.

Al D. Cs. Juan Francisco Pissani Zúñiga, por la asesoría brindada y sus invaluable consejos.

Al Ph.D. Eduardo A. Narro Farías, por su constante apoyo al presente trabajo, sus experiencias transmitidas acerca del tema de tesis y por su invaluable amistad.

Al Ph.D. Manuel Ortega Escobar, por su apoyo al presente trabajo y sus valiosas sugerencias e interés, en la revisión del presente trabajo.

Al Proyecto Fertilización Estatal de los principales Cultivos Básicos del CIA-FAUANL por el apoyo a este trabajo de investigación.

Al M.C. Adolfo García Salinas y al Departamento de Frijol de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por la aportación de cultivares de frijol.

Al Dr. Porfirio Ramírez Vallejo del Programa interdisciplinario de Producción de Semillas perteneciente al Instituto de Recursos Genéticos y productividad del Colegio de Postgraduados, por la aportación de cultivares de frijol.

A mis compañeros y amigos en el Posgrado: Javier Cortéz, Clemente Gallegos, Ricardo Valdez, Sergio García G., Luis Carlos Rimoldi, Neftali Gómez, Elías Treviño, J. Manuel Huerta, Ismael Mata, José Verastegui, Juan Carlos Rodríguez C., Mario Madrigal, José Butrón, Mario Cruz, Juan Carlos Rodríguez O., Rafael Zúñiga, José Luis Woo, Noe y Elvia Flores, Wilder y Nidia Camacho, por la amistad que logramos cultivar.

A mi familia por el apoyo moral que siempre me ha brindado y a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

### **José Luis Lara Mireles**

Candidato para el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas con Especialidad en Agua-Suelo.

### **Tesis**

Balance nutrimental del hierro con respecto a otros nutrimentos en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

### **Áreas de estudio**

Agronomía (Agua-Suelo y Nutrición Vegetal).

## **Biografía**

### **Lugar y fecha de nacimiento**

San Luis Potosí, S.L.P. México el 23 de marzo de 1962.

### **Educación**

Profesional: Escuela de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1979-1983. Título: Ingeniero Agrónomo Fitotecnista.

Maestría: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 1985-1987. Título: Maestro en Ciencias con especialidad en Suelos.

### **Experiencia profesional**

Jefe del Departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UASLP. Jun 1989 a Feb. 1995.

Coordinador del Área de Fitotecnia de la Facultad de Agronomía de la UASLP. Ago. 1993 a Jun. 1995.

Secretario General de la Facultad de Agronomía de la UASLP. May. 2000 a May. 2003.

Profesor-Investigador de la Facultad de Agronomía de la UASLP. Ene. 1988 a la Fecha.

### **Otros**

Mención honorífica. Tesis Profesional. Facultad de Agronomía de la UASLP.

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores como Candidato a Investigador Nacional. 1999-2002.

## ÍNDICE GENERAL

| Capítulo   | Página   |
|--|----------|
| ÍNDICE GENERAL   | i        |
| ÍNDICE DE CUADROS  | v        |
| ÍNDICE DE FIGURAS  | ix       |
| ÍNDICE DE APÉNDICE   | x        |
| RESUMEN  | xii      |
| SUMMARY  | xv       |
| <br>   |          |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b>   | <b>1</b> |
| 1.1 Hipótesis.   | 3        |
| 1.2 Objetivos.   | 4        |
| <br>   |          |
| <b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b>  | <b>5</b> |
| 2.1 Generalidades Sobre la Disponibilidad del Hierro.  | 5        |
| 2.2 Causas de la Clorosis por Deficiencia de Hierro.   | 5        |
| 2.3 Daños Causados por la Clorosis Férrica.  | 7        |
| 2.4 Estrategias de Adaptación a Deficiencia de Hierro.                                       | 7        |
| 2.4.1 El pH de la rizósfera en la absorción de hierro.                                       | 12       |
| 2.4.1.1 Efecto del balance de la absorción de cationes y aniones en la absorción del hierro. | 13       |
| 2.4.2 Sistema reductor de la epidermis de las células de la raíz.                            | 14       |
| 2.4.3 Los ácidos orgánicos en la absorción del hierro.                                       | 17       |
| 2.4.4 Efecto del bicarbonato en la absorción de hierro.                                      | 17       |
| 2.4.5 La humedad del suelo en la disponibilidad del hierro.                                  | 17       |

|                                  |   |           |
|----------------------------------|---|-----------|
| 2.5                              | Características de los Cultivares Seleccionados para Absorción de Hierro en Condiciones de Baja Disponibilidad. | 20        |
| 2.6                              | Transformaciones Microbianas del Hierro.  | 22        |
| 2.7                              | Antagonismo y Sinergismo del Hierro con Respecto a Otros Nutrientes.  | 26        |
| 2.8                              | Control de la Clorosis Férrica.   | 28        |
| 2.8.1                            | Uso de mejoradores del suelo para el control de clorosis férrica.   | 28        |
| 2.8.2                            | Uso de quelatos de hierro para el control de clorosis férrica.  | 29        |
| 2.9                              | Requerimientos Nutrientales del Frijol.   | 34        |
| 2.10                             | Análisis de Tejido Vegetal.   | 39        |
| 2.11                             | Análisis de Crecimiento.  | 31        |
| 2.12                             | Diagnóstico Nutricional.  | 32        |
| 2.12.1                           | Sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS).  | 32        |
| 2.12.2                           | Desviación del porcentaje óptimo (DOP).   | 33        |
| 2.13                             | Hidroponía.   | 36        |
| 2.13.1                           | Medios de cultivo.  | 36        |
| 2.13.2                           | Soluciones y formulaciones.   | 37        |
| <b>III. MATERIALES Y METODOS</b> |   | <b>40</b> |
| 3.1                              | Descripción de la Zona de Estudio.  | 40        |
| 3.1.1                            | Localización.   | 40        |
| 3.1.2                            | Clima.  | 40        |
| 3.1.3                            | Suelo.  | 41        |
| 3.1.4                            | Vegetación.   | 41        |
| 3.2                              | Experimentos Realizados para Alcanzar los Objetivos Planteados.   | 42        |
| 3.3                              | Primera Etapa: Selección de Cultivares Fe-eficientes.   | 43        |
| 3.3.1                            | Experimento I. Tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos.            | 43        |
| 3.3.1.1                          | Desarrollo experimental.  | 43        |
| 3.3.1.2                          | Descripción de los tratamientos.  | 43        |
| 3.3.1.3                          | Diseño experimental.  | 44        |



|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.3.1.4 | Evaluación de los tratamientos.  | 46 |
| 3.3.2   | Experimento II. Cambios del pH de la rizósfera de cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes.                                    | 47 |
| 3.3.2.1 | Desarrollo experimental.   | 47 |
| 3.3.2.2 | Descripción de los tratamientos (cultivares).  | 48 |
| 3.3.2.3 | Diseño experimental.   | 49 |
| 3.3.2.4 | Evaluación de los tratamientos.  | 50 |
| 3.3.3   | Experimento III. Efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.               | 52 |
| 3.3.3.1 | Desarrollo experimental.   | 52 |
| 3.3.3.2 | Descripción y aplicación de los tratamientos.  | 52 |
| 3.3.3.3 | Diseño experimental.   | 54 |
| 3.3.3.4 | Evaluación de los tratamientos.  | 55 |
| 3.4     | Segunda Etapa: Balance Nutricional del frijol.   | 56 |
| 3.4.1   | Experimento IV. Relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).   | 56 |
| 3.4.1.1 | Desarrollo experimental.   | 56 |
| 3.4.1.2 | Descripción de los tratamientos.   | 56 |
| 3.4.1.3 | Diseño experimental.   | 57 |
| 3.4.1.4 | Evaluación de los tratamientos.  | 58 |
| 3.4.2   | Experimento V. Relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i).  | 59 |
| 3.4.2.1 | Desarrollo experimental.   | 59 |
| 3.4.2.2 | Descripción de los tratamientos.   | 60 |
| 3.4.2.3 | Diseño experimental.   | 60 |
| 3.4.2.4 | Evaluación de los tratamientos.  | 61 |
| 3.4.3   | Experimento VI. Efecto de los fertilizantes en el balance nutricional y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo. | 62 |
| 3.4.3.1 | Desarrollo experimental.   | 62 |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.4.3.2    | Descripción de los tratamientos.   | 63         |
| 3.4.3.3    | Diseño experimental.   | 63         |
| 3.4.3.4    | Evaluación de los tratamientos.  | 64         |
| <b>IV.</b> | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>  | <b>66</b>  |
| 4.1        | Primera Etapa. Selección de Cultivares Fe-eficientes.  | 66         |
| 4.1.1      | Experimento I. Tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos.                                       | 66         |
| 4.1.2      | Experimento II. Cambios del pH de la rizósfera de cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes.                                    | 70         |
| 4.1.3      | Experimento III. Efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.               | 74         |
| 4.2        | Segunda Etapa: Balance Nutricional del frijol.   | 86         |
| 4.2.1      | Experimento IV. Relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).   | 86         |
| 4.2.2      | Experimento V. Relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i).  | 94         |
| 4.2.3      | Experimento VI. Efecto de los fertilizantes en el balance nutricional y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo. | 102        |
| <b>V.</b>  | <b>CONCLUSIONES</b>  | <b>115</b> |
| <b>VI.</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>119</b> |
|            | <b>APÉNDICE</b>  | <b>122</b> |

## ÍNDICE DE CUADROS

| No. | Título   | Pág. |
|-----|--|------|
| 1   | Características de los sistemas para el transporte de electrones a través del plasmalema de las células de las plantas.  | 15   |
| 2   | Efecto de macro y micronutrientos en su antagonismo y sinergismo para la planta con respecto al hierro.  | 27   |
| 3   | Rangos de concentración de nutrientes propuestos por Jones <i>et al.</i> (1991) en folíolos de frijol al inicio de la floración.   | 35   |
| 4   | Concentración de nutrientes mínima, máxima y óptima de las soluciones de Swartz y Douglas en ppm.  | 39   |
| 5   | Características de los suelos utilizados en el experimento para seleccionar los cultivares tolerantes a clorosis férrica.  | 44   |
| 6   | Material genético utilizado en el experimento para clasificar los cultivares tolerantes a clorosis férrica.  | 45   |
| 7   | Escala de clasificación para los diferentes grados de clorosis férrica de acuerdo a la utilizada por Hernández <i>et al.</i> , 1996.   | 46   |
| 8   | Componentes químicos y cantidades utilizadas en la solución nutricional Hoagland modificada por Johnson <i>et al.</i> , tomado de Epstein, 1972.   | 48   |
| 9   | Concentración de los elementos nutritivos en la solución Hoagland modificada por Johnson <i>et al.</i> , tomado de Epstein, 1972.  | 49   |
| 10  | Características fisicoquímicas y contenido nutricional de los suelos utilizados en el experimento efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.                                    | 53   |
| 11  | Características fisicoquímicas y contenido nutricional del suelo utilizado en el experimento efecto de los fertilizantes en el balance nutricional y corrección de la clorosis férrica del frijol.   | 62   |
| 12  | Análisis de varianza para el grado de clorosis presentado por los diferentes cultivares de frijol a los 45 días después de la emergencia del experimento “tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos”. | 66   |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 13 | Principales grupos conformados por la prueba de medias para grado de clorosis férrica presentado a los 45 días por los diferentes cultivares en estudio y su clasificación de acuerdo a la tolerancia a la clorosis férrica.  | 68 |
| 14 | Color obtenido en el medio nutritivo con diferente pH.  | 70 |
| 15 | Cuadrados medios del análisis de varianza para pH de la rizósfera de los diferentes cultivares del experimento “cambios del pH de la rizósfera de cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes”.  | 71 |
| 16 | Prueba de medias para los promedios de pH de los diferentes cultivares del experimento “cambios del pH de la rizósfera de cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes”.  | 71 |
| 17 | Comparación de medias para grado de clorosis, floración, altura (cm), producción de materia seca (g planta <sup>-1</sup> ) y rendimiento de grano del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”. | 76 |
| 18 | Comparación de medias para los componentes del rendimiento del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.  | 79 |
| 19 | Comparación de medias para contenido nutrimental del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.  | 80 |
| 20 | Comparación de medias para la relación del contenido foliar del Fe con otros nutrimentos del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.  | 81 |
| 21 | Contenido nutrimental e índices DOP para los tratamientos del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.   | 84 |
| 22 | Tendencias del pH y de la C.E. de las soluciones nutrimentales utilizadas en el experimento “relación del hierro con macronutrimentos y micronutrimentos en frijol (ciclo p-v)”.  | 86 |
| 23 | Comparación de medias para días a floración, altura de planta, área foliar y materia seca de los diferentes tratamientos del experimento “relación del hierro con macronutrimentos y micronutrimentos en frijol (ciclo p-v)”.   | 88 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 24 | Comparación de medias para la variable clorosis a los 25 y 35 días después del trasplante del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”.                                | 89 |
| 25 | Cuadrados medios de las variables clorofila a, clorofila b, clorofila total y la relación clorofila a/b del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”.                  | 89 |
| 26 | Comparación de medias para contenidos de clorofila a, b, a+b y la relación a/b del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”.   | 90 |
| 27 | Comparación de medias para contenido nutrimental del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”.   | 91 |
| 28 | Comparación de medias para la relación del contenido foliar del Fe con otros nutrientes del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”.                                  | 91 |
| 29 | Contenido nutrimental e índices DOP para los tratamientos del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”.  | 93 |
| 30 | Tendencias del pH y de la CE de las soluciones nutritivas utilizadas en el experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”.   | 94 |
| 31 | Comparación de medias para días a floración, altura de planta, área foliar y materia seca de los diferentes tratamientos del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”. | 95 |
| 32 | Comparación de medias para la variable Clorosis a los 25 y 35 días después del trasplante del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”.                                | 96 |
| 33 | Cuadrados medios de las variables clorofila a, clorofila b, clorofila total y la relación clorofila a/b del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”.                  | 97 |
| 34 | Comparación de medias para contenidos de clorofila a, b, a+b y la relación a/b del experimento “relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”.   | 97 |
| 35 | Comparación de medias para contenido nutrimental del experimento  | 99 |

|    |  |     |
|----|--|-----|
|    | “relación del hierro con macronutrientos y micronutrientos en frijol (ciclo o-i)”.   |     |
| 36 | Comparación de medias para la relación del contenido foliar del Fe con otros nutrientes del experimento “relación del hierro con macronutrientos y micronutrientos en frijol (ciclo o-i)”.   | 99  |
| 37 | Contenido nutrimental e índices DOP para los tratamientos del experimento “relación del hierro con macronutrientos y micronutrientos en frijol (ciclo o-i)”.   | 101 |
| 38 | Comparación de medias para la variable clorosis a los 15, 30, 45 y 60 días, Biomasa (materia seca) y rendimiento de grano del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”. | 103 |
| 39 | Cuadrados medios de las variables clorofila a, clorofila b, clorofila total y la relación clorofila a/b del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.                   | 106 |
| 40 | Comparación de medias para contenidos de clorofila a, b, a+b y la relación a/b del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.  | 107 |
| 41 | Comparación de medias para contenido nutrimental del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.  | 109 |
| 42 | Comparación de medias para la relación del contenido foliar del Fe con otros nutrientes del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.                                   | 110 |
| 43 | Contenido nutrimental e índices DOP para los tratamientos del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.   | 113 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>Fig.</b> | <b>Título</b>  | <b>Pág.</b> |
|-------------|--|-------------|
| 1           | Siembra de las diferentes variedades en estudio de frijol, en un medio nutritivo (agar y solución Hoagland) con indicador de pH, esterilizado.   | 51          |
| 2           | Diferentes colores indicadores del pH del medio nutritivo. El color púrpura indica un pH alcalino y el color amarillo indica un pH ácido.  | 51          |
| 3           | Las variedades AN 22 (a) y el Pinto Mexicano 80 (b) acidifican el medio hasta un pH de 3. El color púrpura indica un pH alcalino (negro en las figuras) y el color amarillo indica un pH ácido (blanco en las figuras). Se puede observar que la variedad AN 22 acidifica el medio con mayor intensidad y mayor proporción que el Pinto Mex. 80. | 73          |
| 4           | Las variedades Lagunero 87 y el Durango 222 no acidifican el medio nutritivo. El color púrpura indica un pH alcalino (negro en la figura).   | 73          |

## ÍNDICE DE APÉNDICE

| <b>No.</b> | <b>Título</b>  | <b>Pág.</b> |
|------------|--|-------------|
| A1         | Procedimientos analíticos utilizados para los análisis de suelos y plantas.  | 126         |
| A2         | Cuadrados medios del análisis de varianza para clorosis, altura de planta, días a floración y rendimiento del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.                    | 127         |
| A3         | Cuadrados medios del análisis de varianza para componentes del rendimiento del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.  | 128         |
| A4         | Cuadrados medios del análisis de varianza para contenido de nutrimentos del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.   | 129         |
| A5         | Cuadrados medios del análisis de varianza para la proporción del contenido foliar del hierro con respecto a otros nutrimentos del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos. | 130         |
| A6         | Correlaciones (Pearson) de diferentes variables medidas en el experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.   | 131         |
| A7         | Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables clorosis, peso de raíz, días a floración, altura de planta, área foliar y materia seca del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrimentos en frijol (ciclo p-v)”.   | 133         |
| A8         | Cuadros medios del análisis de varianza para contenido de nutrimentos del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrimentos en frijol (ciclo p-v)”.   | 134         |
| A9         | Cuadrados medios del análisis de varianza para la proporción del contenido foliar de Fe con otros nutrimentos del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrimentos en frijol (ciclo p-v)”.   | 134         |
| A10        | Correlaciones (Pearson) de diferentes variables medidas en el experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrimentos en frijol (ciclo p-v)”.   | 135         |



|     |  |     |
|-----|--|-----|
| A11 | Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables clorosis, días a floración, altura de planta, área foliar y materia seca del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientos en frijol (ciclo o-i)”.  | 137 |
| A12 | Cuadrados medios del análisis de varianza para el contenido de nutrientes del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientos en frijol (ciclo o-i)”.  | 137 |
| A13 | Cuadrados medios del análisis de varianza para las proporciones del contenido foliar del Fe con otros nutrientes y de la sumatoria de los índices DOP ( $\Sigma$ DOP) del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientos en frijol (ciclo o-i)”.  | 138 |
| A14 | Correlaciones (Pearson) de diferentes variables medidas en el experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientos en frijol (ciclo o-i)”.  | 139 |
| A15 | Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables Clorosis a los 15, 30, 45 y 60 días, producción de Biomasa (materia seca) y rendimiento de grano del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.         | 141 |
| A16 | Cuadros medios del análisis de varianza para el contenido de nutrientes del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.   | 142 |
| A17 | Cuadrados medios del análisis de varianza para las proporciones del contenido foliar del Fe con otros nutrientes y de la sumatoria de los índices DOP ( $\Sigma$ DOP) del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”. | 142 |
| A18 | Correlaciones (Pearson) de diferentes variables medidas en el experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.   | 143 |

## RESUMEN

**José Luis Lara Mireles**

**Fecha de Graduación: Enero, 2006**

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Agronomía**

**Título del Estudio: BALANCE NUTRIMENTAL DEL HIERRO CON  
RESPECTO A OTROS NUTRIMENTOS EN FRIJOL  
(*Phaseolus vulgaris* L.)**

**Número de páginas: 144**

**Candidato para el grado de Doctor en Ciencias  
Agrícolas con Especialidad en Agua Suelo.**

**Área de Estudio:** Agronomía (Agua-Suelo y Nutrición Vegetal).

**Propósitos y Métodos de Estudio:** La clorosis férrica que se expresa en plantas cultivadas en suelos calcáreos de zonas con escasa precipitación pluvial, puede reducir de 40 a 75 % el rendimiento de los genotipos de frijol susceptibles a deficiencia de hierro. En consecuencia, el presente estudio plantea los siguientes objetivos: 1. Clasificar el grado de tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos, 2. Evaluar los cambios de pH generados en la rizósfera de plantas de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes sometidas a deficiencia de hierro, 3. Determinar el grado de clorosis en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en diferentes condiciones de humedad en suelos calcáreos, 4. Determinar el efecto de la deficiencia de hierro (clorosis férrica) en el balance nutrimental (relación del hierro con algunos macronutrientes y micronutrientes) y rendimiento en plantas de frijol hierro eficientes e ineficientes y 5. Evaluar la influencia de los fertilizantes en el balance nutrimental de la planta, corrección de la clorosis férrica y rendimiento del frijol. Para alcanzar los objetivos planteados, el proyecto se dividió en dos etapas, la primera consistió en la selección de cultivares Fe-eficientes y la segunda etapa consistió en determinar el balance nutrimental del frijol. Los experimentos se establecieron en el área de Invernaderos y el Campo Agrícola Experimental de la FAUANL.

**Contribuciones y Conclusiones:** En la primera etapa, en el primer experimento, los cultivares que presentaron mayor clorosis férrica, se desarrollaron en el suelo migajon arcilloso (2.3 ppm de Fe disponible) en comparación con el suelo franco arcillo limoso (3.8 ppm de Fe disponible) y los cultivares se clasificaron desde Completamente tolerantes hasta altamente susceptibles. En el segundo experimento, los cultivares de Frijol que más acidificaron el pH de la rizósfera (hasta valores menores de 3.0) fueron el AN 22 y Pinto Mexicano 80. En el tercer experimento se encontró diferencia en el rendimiento por efecto de las diferentes condiciones de humedad, pero no en el grado de clorosis; el genotipo Canario 101 de crecimiento determinado fue el que mostró mayor grado de clorosis férrica con menor producción de materia seca y grano por planta,. los genotipos Durango 222 y el AN 22, presentaron un crecimiento indeterminado y presentaron menor grado de clorosis férrica con mayor producción de materia seca y grano por planta. En la segunda etapa, en el cuarto y quinto experimentos, la aplicación de la solución nutritiva, con menor contenido de Fe, causó un menor contenido de Clorofila a, b y total, además disminuyó la proporción clorofila a:b, lo que causó síntomas de clorosis férrica en las variedades en estudio; esto disminuyó la altura, el área foliar y la producción de materia seca por planta, además de retrasar la floración. El cultivar Canario 101 aunque presentó contenidos adecuados de Fe en las hojas, presentó mayor grado de clorosis férrica debido a su menor contenido de clorofila. En el quinto experimento el contenido de clorofila a y la relación clorofila a:b, determinó el grado de clorosis férrica en los cultivares en estudio; se determinó que la clorosis férrica depende del contenido de clorofila y no de la concentración de Fe foliar. En el sexto experimento la aplicación foliar y al suelo de hierro en forma de fertilizantes y quelatos, no corrigieron el grado de clorosis ni incrementaron el contenido de clorofila en las hojas, pero si incrementaron el rendimiento de grano por planta. Los cultivares de mayor rendimiento de grano fueron el AN-22 y el Lagunero 87. El cultivar Canario 101 presentó un menor contenido de Clorofila a, b y total, además disminuyó la proporción clorofila a:b, lo que causó síntomas de clorosis férrica y menor rendimiento de grano por planta.

**FIRMA DEL ASESOR PRINCIPAL:** \_\_\_\_\_

## SUMMARY

**José Luis Lara Mireles**

**Graduation: January, 2006**

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Agronomía**

**Título of Research Work: BALANCE NUTRIMENTAL DEL HIERRO CON  
RESPECTO A OTROS NUTRIMENTOS EN FRIJOL  
(*Phaseolus vulgaris* L.)**

**Number of pages: 144**

**Candidate to obtain the Doctor in Agricultural  
Sciences degree. Water and Soil Sciences.**

**Subjects of the Research Work:** Agronomy (Water-Soil and Plant Nutrition).

**Aims and Methods of the Research Work:** Commonly the Fe-chlorosis sintoms are evident in plants growing on calcareous soils in agricultural fields under scarce rainfall conditions. This situation could be the meaningful reason of diminished yields (between 40 to 75 %) of Fe-inefficient bean genotypes. As a corollary, the present study was carried on the next objectives: 1. Identify the Fe-efficient and Fe-inefficient bean genotypes under conditions of calcareous soils. 2. Evaluate bean genotypes Fe-efficient and Fe-inefficient on their capacity to decrease the pH of the rhizosphere when subjected to Fe-stress. 3. Determinate Fe-chlorosis levels in Fe-efficient and Fe-inefficient beans genotypes under different humidity conditions on calcareous soils. 4. Determinate the effect of Fe-stress (iron chlorosis) in the nutrient balance (relationships between Fe and other micro and macronutrients) and yield in Fe-efficient and Fe-inefficient beans genotypes and 5. Evaluate the influence of fertilizers in the nutrient balance of the plant and correction of the ferric chlorosis and yield of the bean. For research the planed objectives, the project divided in two period; the first step was selection of Fe-efficient bean genotypes and the Second period was determinate the nutrient balance of the bean.

The researches were established at the Agricultural Experimental Station of the Faculty of Agronomy of the UANL.

**Contributions and conclusions:** In the first step, in the first experiment, the most severe symptoms were observed on the clay loam soil, which presented 2.3 ppm of Fe-available, compared with 3.8 ppm of Fe-available the silt clay loam soil; the cultivars were classifying all them like tolerant varieties until the susceptible varieties to ferric chlorosis. In the second experiment, the bean genotypes AN-22 and Pinto mexicano 80 showed capacity to decrease the pH of the rhizosphere (pH as low 3.0). In the third experiment there was yield difference due to different humidity conditions of the soil, both not in the Fe-chlorosis levels; the Canary 101 genotype presented a major Fe-chlorosis levels whit minor yield of dry mater and grain; the Durango 222 and AN-22 genotypes presented minor Fe-chlorosis levels whit major yield of dry mater and grain. In the second period, in the four and five experiments, the used of solution nutrimental with minor Fe level, caused a minor content of Chlorophyll a, b and total, the proportion also diminished chlorophyll a/chlorophyll b, producing symptoms of ferric chlorosis. The cultivar Canary 101 presented adequate contents of Fe foliar both with minor chlorophyll contents, causing major Fe-chlorosis. In the five experiment, the chlorophyll contents have been identified as the major reasons of leaf bean Fe-chlorosis more than the content iron foliar. In the experiment six, the application of quelatos or fertilizers with iron in foliar form and to the soil, didn't increase the content of chlorophyll in the leaves and didn't decreased the Fe-chlorosis, the same happen with the fertilizers of acid reaction. Both increased the yield grain. The variety Canary 101 presented a minor content of Chlorophyll a, b and total, the proportion also diminished chlorophyll a/chlorophyll b, producing symptoms of ferric chlorosis. The variety AN-22 (Fe-efficient) didn't present significant differences in the content of chlorophyll and ferric chlorosis in comparison with the 87 Lagunero variety.

**MAIN ADVISOR SIGNATURE:** \_\_\_\_\_

# BALANCE NUTRIMENTAL DEL HIERRO CON RESPECTO A OTROS NUTRIMENTOS EN FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.)

## I INTRODUCCIÓN

México se considera el centro primario del frijol y cuenta con una gran variabilidad genética adaptada a diferentes características climáticas y edáficas. El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una leguminosa de gran importancia en México por ser la fuente principal de proteína en la alimentación, es el segundo cultivo nacional de mayor superficie cultivada (1'819,165 ha) después del maíz, con un rendimiento promedio de 529 kg ha<sup>-1</sup> (Consejo Nacional Agropecuario, 1991). El rendimiento medio bajo condiciones favorables, oscila alrededor de 1300 kg ha<sup>-1</sup> y bajo temporal de 500 kg ha<sup>-1</sup> (Cortinas, 1985). Los bajos rendimientos se atribuyen principalmente a la acción e interacción de diversos factores como plagas, enfermedades, sequía, deficiencia de nutrimentos entre otros factores.

En la actualidad, el estudio de la adaptación de las plantas a diferentes niveles de disponibilidad de nutrimentos, es de gran importancia por la diversidad de suelos de nuestro país y por el alto costo de los fertilizantes. Los desórdenes nutricionales de los cultivos asociados con elementos menores han adquirido importancia creciente conforme se difunde la tecnología de nuevas variedades de alto rendimiento.

La clorosis ocasionada por deficiencia de hierro (Fe), se reconoció desde 1844 (Loué, 1988) y aún cuando fue la primera deficiencia nutrimental en plantas en ser investigada, en la actualidad se reconoce como la más difícil de entender y corregir (Romera y Días, 1991). Este factor limita el desarrollo vegetal y en casos severos causa la muerte de la misma. Comúnmente la clorosis férrica se observa en plantas cultivadas en suelos calcáreos con escasa precipitación pluvial y puede reducir entre un 40 a un 75 por ciento el rendimiento de las variedades susceptibles de frijol (Cortinas, 1985).

Aunque el Fe es con mucho, el micronutriente más abundante en los suelos, y por su abundancia se considera el cuarto elemento en peso de la corteza terrestre (alrededor del 5%), después del oxígeno, el silicio y el aluminio (Chen y Barak, 1982), pero no todas las formas químicas son asimilables. En suelos de pH alto (cerca de 8.0) las deficiencias de P y Fe son comunes. En general la clorosis se produce por insuficiente absorción de Fe, aunque a veces puede ser debida a la inactivación del Fe dentro de la planta.

Algunas especies de plantas, principalmente dicotiledóneas y monocotiledóneas no gramíneas, han desarrollado un mecanismo conocido como estrategia I, que se caracteriza por acidificar la rizósfera y solubilizar los nutrientes no disponibles en un medio alcalino (Jones, 2000) e incrementar la actividad de una reductasa asociada a la membrana, la cual aumenta la tasa de reducción del  $\text{Fe}^{+3}$ . En la absorción del Fe por las dicotiledóneas (plantas con estrategia I) el factor más determinante, además del genético, es el pH elevado del suelo. En gramíneas se presenta la estrategia II, que se caracteriza por la liberación de compuestos quelatantes de  $\text{Fe}^{+3}$  llamados fitosideróforos (Marschner, 2002).

Entre los métodos para controlar la deficiencia de hierro se incluyen la aplicación foliar del nutriente, un adecuado manejo del cultivo y el uso de variedades resistentes. La literatura publicada sobre el desarrollo de la clorosis con respecto al balance nutricional del hierro con otros elementos dentro de la planta (relaciones óptimas) y la reacción del hierro con otros elementos y compuestos en el suelo es muy escasa. En consecuencia, la presente investigación se diseñó para estudiar la dinámica del hierro en el cultivo del frijol, bajo condiciones de deficiencia.

## 1.1 Hipótesis.

La hipótesis general del trabajo es la siguiente:

Una planta con un balance nutricional adecuado de macro y micronutrientes dentro de sus tejidos expresa mejor su capacidad de rendimiento, por lo tanto, niveles adecuados de hierro con respecto a otros nutrientes evita la clorosis y daños causados por la deficiencia de hierro.

Las hipótesis en que se basa el presente trabajo son:

- a) Entre los diferentes cultivares de frijol existen materiales capaces de absorber hierro en condiciones de baja disponibilidad del mismo, los cuales se les conoce como hierro eficientes, por lo tanto dentro de los genotipos comerciales utilizados en la zona, existen plantas hierro eficientes, que pueden desarrollarse en suelos calcáreos.
- b) Las plantas dicotiledóneas tienen mecanismos para incrementar la disponibilidad de los nutrientes por medio de acidificación de la rizósfera, por lo tanto, las plantas de frijol Fe-eficientes pueden acidificar la rizósfera y hacer soluble el Fe no disponible para la planta.
- c) Las plantas hierro eficientes son capaces de absorber el hierro en condiciones de oxidación, por lo tanto, algunos cultivares podrían no afectar su rendimiento en condiciones de oxidación, causada por déficit de agua en el suelo.
- d) Una planta con deficiencia de hierro presenta clorosis por disminución de la cantidad de clorofila, repercutiendo en la eficiencia de la fotosíntesis, obteniendo una menor producción de grano, por lo tanto niveles adecuados de hierro evitan la clorosis, favorece el balance nutricional e incrementa el rendimiento de grano.
- e) La aplicación adecuada de fertilizantes incrementa la disponibilidad de los nutrientes para la planta, por lo tanto, en suelos de baja disponibilidad de hierro los



fertilizantes favorecen un balance nutrimental en la planta corrigiendo la clorosis férrica logrando así un incremento en el rendimiento.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general que se pretende alcanzar es:

Encontrar el adecuado balance de nutrimentos con respecto al hierro en la planta que permita la máxima producción del cultivo de acuerdo a su potencial genético.

Los objetivos específicos que se pretenden alcanzar son:

- a) Clasificar el grado de tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos en condiciones de invernadero.
- b) Evaluar los cambios de pH generados en la rizósfera de plantas de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes sometidas a deficiencia de hierro.
- c) Determinar el grado de clorosis en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en diferentes condiciones de humedad en suelos calcáreos.
- d) Determinar el efecto de la deficiencia de hierro (clorosis férrica) en el balance nutrimental (relación del hierro con algunos macronutrimentos y micronutrimentos) y rendimiento en plantas de frijol hierro eficientes e ineficientes.
- e) Evaluar la influencia de los fertilizantes en el balance nutrimental de la planta y corrección de la clorosis férrica y rendimiento del frijol.

# APENDICE

Cuadro A1. Procedimientos analíticos utilizados para los análisis de suelos y plantas.

| Determinación en suelo <sup>1</sup>       | Método  | Referencia   |
|---|---|--|
| Textura                                   | Hidrómetro de Bouyoucos   | Gee y Bauder, 1986 **  |
| Densidad aparente.                        | Probeta. Peso de 100 mL, corregido por humedad                                  |  |
| Humedad a CC y PMP.                       | Cálculo. Contenido de arena, limo y arcilla.                                    |  |
| Materia orgánica                          | Walkley y Black   | Nelson y Sommers, 1996 *   |
| pH  | Potenciométrico<br>Suelo:Agua (1:2)   | Thomas, 1996 *   |
| Nitrógeno total.                          | Microkjeldahl   |  |
| Potasio.                                  | Morgan  | **<br>*  |
| Fósforo asimilable                        | Olsen (suelo calcáreo)  | Kuo, S. 1996 *   |
| Cationes intercambiables (K, Ca, Mg y Na) | Acetato de amonio neutro 1N, pH 7. Absorción atómica.                           | Sumner y Miller, 1996 *  |
| Carbonatos totales, %                     | Neutralización de ácido (HCL)   | Loeppert y Suarez, 1996 *  |
| Micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu)         | Absorción atómica<br>DTPA-TEA   | Reed y Martens, 1996; Loepper y Inskeep, 1996; Gambrell, 1996. * |
| Sales solubles (CE, aniones y cationes)   | Extracto de saturación.<br>Puente de conductividad.<br>Volumetría (Titulación). | Rhoades, 1996. *   |

<sup>1</sup>Suelo. Las muestras se secan al aire, se muelen con mazo de madera y se tamizan con malla de 2 mm para las determinaciones físicas y de salinidad. Y, con malla de 0.5 mm para las de fertilidad.

| Determinación en planta   | Método   | Referencia                  |
|---|--|-----------------------------|
| Nitrógeno total.  | Microkjeldahl. Con mezcla reactiva de selenio. |                             |
| Potasio, Calcio, Magnesio, Hierro, Cobre, Zinc, Manganeso y Aluminio. | Absorción atómica.<br>Digestión seca.          | Rodríguez y Rodríguez, 2002 |

\* Plantas. Las muestras se lavan con agua corriente y un detergente líquido libre de fosfatos y dos veces con agua destilada y se secan a temperatura ambiente, luego en estufa de desecación a 60-65 °C y se muelen a pasar una malla de 1 mm.

\* Methods of soil Analysis. Part. 3. Chemical Methods. SSSA Book Series N° 5.

\*\* Agronomy No. 9 (Part. 1) Physical and Mineralogical Methods 2<sup>nd</sup> Ed. SSSA, Madison, Wi. USA.

\*\*\* Métodos de análisis de suelos y plantas. 2002. Rodríguez y Rodríguez. Ed. Trillas-UANL



Cuadro A2. Cuadrados medios del análisis de varianza para clorosis, altura de planta, días a floración y rendimiento del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.

| F.V.                       | g.l | Clorosis 35 días | Clorosis 45 días | Clorosis 55 días | Altura de planta, cm | Floración días | Materia seca/plant a | Rento. Grano/planta |
|----------------------------|-----|------------------|------------------|------------------|----------------------|----------------|----------------------|---------------------|
| Bloque                     | 1   | 0.323477 NS      | 0.12337 NS       | 0.003906 NS      | 02547.7 NS           | 002.25 NS      | 0319.1 NS            | 4.84 NS             |
| Suelos                     | 1   | 0.008327 NS      | 0.00660 NS       | 0.020306 NS      | 31072.8 NS           | 081.00 NS      | 1124.7 NS            | 40.32 *             |
| Error a                    | 1   | 0.08193986       | 0.00975156       | 0.001600         | 1267.46              | 9.00           | 15.503906            | 0.06250             |
| Humedad                    | 1   | 0.177452 NS      | 0.12337 *        | 0.003906 NS      | 25312.8 **           | 005.06 NS      | 1259.3 NS            | 1734.7 *            |
| Suelo x Humedad            | 1   | 3.576827 NS      | 0.38595 **       | 0.027225 NS      | 09501.3 **           | 022.56 NS      | 0713.5 NS            | 25.50 NS            |
| Error b                    | 1   | 0.08776406       | 0.00007656       | 0.001600         | 0.225625             | 0.5625         | 24.875156            | 0.56250             |
| Cultivares                 | 7   | 0.320052 **      | 0.25549 **       | 0.182146 **      | 13958.3 **           | 134.50 **      | 0145.7 **            | 63.24 **            |
| Suelo x Cultivar           | 7   | 0.034359 NS      | 0.03527 *        | 0.010935 NS      | 00715.2 *            | 009.29 *       | 0031.2 *             | 8.15 **             |
| Humedad x Cultivar         | 7   | 0.048277 NS      | 0.02784 NS       | 0.013278 NS      | 00669.1 NS           | 001.92 NS      | 0027.8 NS            | 13.67 **            |
| Suelo x Humedad x Cultivar | 7   | 0.099730 **      | 0.00885 NS       | 0.009946 NS      | 00695.4 NS           | 001.78 NS      | 0026.6 NS            | 3.44 NS             |
| Error c                    | 29  | 0.02740242       | 0.0124981        | 0.01311358       | 300.252026           | 2.9030172      | 12.069207            | 2.364655            |
| C.V. %                     |     | 11.56            | 7.77             | 10.58            | 17.42                | 3.84           | 24.23                | 10.22               |

NS No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\* Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A3. Cuadrados medios del análisis de varianza para componentes del rendimiento del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.

| F.V.                        | g.l | Vainas por planta | Tamaño de vaina | No. de granos por vaina | Peso de 100 semillas |
|-----------------------------|-----|-------------------|-----------------|-------------------------|----------------------|
| Bloque                      | 1   | 17.02 NS          | 1.156 NS        | 0.391 NS                | 0.040 NS             |
| Suelos                      | 1   | 47.27 NS          | 2.723 NS        | 0.766 NS                | 1.103 NS             |
| Error a                     | 1   | 118.2656          | 0.02250         | 0.1406250               | 3.06250              |
| Humedad                     | 1   | 1472.64 NS        | 16.606 *        | 3.516 *                 | 85.563 NS            |
| Suelo x Humedad             | 1   | 178.89 NS         | 2.560 *         | 0.391 NS                | 121.000 NS           |
| Error b                     | 1   | 147.02            | 0.0156250       | 0.0156250               | 49.70250             |
| Cultivar                    | 7   | 184.19 **         | 7.660 **        | 1.641 **                | 675.934 **           |
| Suelo x Cultivar            | 7   | 32.55 NS          | 0.368 *         | 0.408 *                 | 10.673 NS            |
| Humedad x Cultivar          | 7   | 39.14 NS          | 0.258 NS        | 0.373 NS                | 8.527 NS             |
| Sue. x Humedad x Cultivares | 7   | 29.18 NS          | 0.145 NS        | 0.533 *                 | 9.279 NS             |
| Error c                     | 29  | 36.5932112        | 0.13297414      | 0.17079741              | 15.85913793          |
| C.V. %                      |     | 30.46             | 3.72            | 8.34                    | 9.81                 |

NS No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\* Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A4. Cuadrados medios del análisis de varianza para contenido de nutrientes del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.

| F.V.                | g.l | N          | P          | K          | Ca         | Mg         | Fe        | Cu       | Zn       | Mn        |
|---------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|----------|-----------|
| Bloque              | 1   | 0.581406NS | 0.002609NS | 0.018225NS | 0.169127NS | 0.007439NS | 522.69NS  | 18.92NS  | 87.89NS  | 654.08NS  |
| Suelos              | 1   | 0.348100NS | 0.238877NS | 4.462656** | 0.109727NS | 0.513014NS | 670.16NS  | 36.60NS  | 95.55NS  | 3981.6NS  |
| Error a             | 1   | 0.14250625 | 0.02138906 | 0.000225   | 0.01351406 | 0.01925156 | 34.07641  | 145.8056 | 357.27   | 202.3506  |
| Humedad             | 1   | 0.354025NS | 0.001502NS | 0.381306NS | 0.163014NS | 0.036577NS | 157.82NS  | 66.83NS  | 19.36NS  | 184.96NS  |
| Suelo x Humedad     | 1   | 0.040000NS | 0.006602NS | 0.288906NS | 0.000977NS | 0.015939NS | 8061.8NS  | 20.25NS  | 928.7NS  | 146.41NS  |
| Error b             | 1   | 0.03705625 | 0.02066406 | 0.198025   | 0.00832656 | 0.005439   | 604.54515 | 4.2025   | 16.60562 | 21.390625 |
| Cultivar            | 7   | 1.052104** | 0.008907** | 0.075949NS | 0.108528** | 0.021619** | 3846.50** | 14.59*   | 94.85*   | 426.76**  |
| Suelo x Cultivar    | 7   | 0.202014*  | 0.008637** | 0.064206NS | 0.021562NS | 0.005364NS | 907.90**  | 15.91*   | 66.93NS  | 226.09*   |
| Hum. x Cultivar     | 7   | 0.700968** | 0.002841NS | 0.046821NS | 0.047835** | 0.004798NS | 1654.00** | 18.64*   | 143.07** | 199.76*   |
| Sue. x Hum. x Cult. | 7   | 0.151093NS | 0.005855*  | 0.035992NS | 0.086377** | 0.014146** | 848.43**  | 16.14*   | 146.28** | 264.82**  |
| Error c             | 29  | 0.06909763 | 0.00210932 | 0.04550431 | 0.00955458 | 0.00272139 | 189.68343 | 5.74032  | 38.02392 | 70.482349 |
| C.V. %              |     | 5.41       | 10.25      | 5.67       | 4.00       | 6.31       | 7.85      | 9.03     | 10.25    | 9.43      |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A5. Cuadrados medios del análisis de varianza para la proporción del contenido foliar del hierro con respecto a otros nutrientes del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.

| F.V.                        | g.l | Fe:N       | Fe:P       | Fe:K       | Fe:Ca      | Fe:Mg      | Fe:Cu     | Fe:Zn     | Fe:Mn      |
|-----------------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|
| Bloque                      | 1   | 128.43 NS  | 24897 NS   | 40.704 NS  | 470.619 *  | 3061.13 NS | 4.7035 NS | 0.2413 NS | 0.15406 NS |
| Suelos                      | 1   | 1.884 NS   | 144762 NS  | 320.87 NS  | 486.258 *  | 22419.8 NS | 0.3675 NS | 0.2316 NS | 4.1412 *   |
| Error a                     | 1   | 2.5281     | 23877.59   | 2.8645563  | 0.11988906 | 1354.60803 | 10.104451 | 0.3349516 | 0.0126563  |
| Humedad                     | 1   | 42.153 NS  | 380.29 NS  | 43.791 *   | 287.599 NS | 3152.26 NS | 4.8896 NS | 0.1000 NS | 0.1444 **  |
| Suelo x Humedad             | 1   | 241.65 NS  | 81396 NS   | 971.569 *  | 1473.69 NS | 16265.8 NS | 4.5316 NS | 11.911 *  | 0.1296 **  |
| Error b                     | 1   | 11.323225  | 32096.969  | 0.265225   | 61.681389  | 188.444256 | 1.5908    | 0.0199516 | 0.0000063  |
| Cultivar                    | 7   | 244.355 ** | 27281.3 ** | 243.486 ** | 520.360 ** | 4729.32 ** | 5.1602 ** | 1.6063 ** | 0.7772 **  |
| Suelo x Cultivar            | 7   | 18.438 NS  | 10006.7 ** | 50.196 NS  | 304.366 ** | 2621.41 ** | 2.7211 *  | 0.9144 ** | 0.2242 NS  |
| Humedad x Cultivar          | 7   | 103.604 ** | 12169.8 ** | 181.044 ** | 447.307 ** | 3307.1 **  | 5.2024 ** | 1.4924 ** | 0.2829 NS  |
| Sue. x Humedad x Cultivares | 7   | 32.035 *   | 10611.5 ** | 93.122 **  | 177.557 ** | 1731.83 *  | 1.6535 NS | 0.5937 ** | 0.2734 NS  |
| Error c                     | 29  | 10.051494  | 2592.9739  | 25.050418  | 41.836361  | 627.92739  | 0.8617886 | 0.177839  | 0.1346304  |
| C.V. %                      |     | 8.68       | 12.48      | 10.64      | 8.91       | 11.57      | 13.76     | 13.96     | 18.04      |

NS No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\* Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A6. Correlaciones (Pearson) de diferentes variables medidas en el experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.

|       | N     | P     | K        | Ca     | Mg       | Fe     | Cu    | Zn     | Mn      | ΣDOP     | Fe:N     | Fe:P     | Fe:K     | Fe:Mg    | Fe:Ca    | Fe:Mn    | Fe:Zn    | Fe:Cu    |
|-------|-------|-------|----------|--------|----------|--------|-------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| N     | 1.000 | 0.190 | 0.030    | -0.070 | 0.052    | 0.063  | 0.138 | -.156  | -.194   | -0.055   | -0.50 ** | -0.119   | 0.031    | -0.018   | 0.096    | 0.205    | 0.143    | -0.011   |
| P     |       | 1.000 | 0.551 ** | -0.193 | 0.504 ** | 0.026  | 0.200 | -.014  | -0.31 * | 0.114    | -0.078   | -0.72 ** | -0.224   | -0.289 * | 0.121    | 0.257 *  | -0.022   | -0.085   |
| K     |       |       | 1.000    | -0.046 | 0.694 ** | 0.069  | 0.095 | -.052  | -0.32 * | 0.422 ** | 0.045    | -0.38 ** | -0.41 ** | -0.40 ** | 0.094    | 0.290 *  | -0.019   | -0.025   |
| Ca    |       |       |          | 1.000  | 0.322 ** | -0.109 | 0.094 | -.028  | 0.194   | 0.495 ** | -0.072   | 0.047    | -0.065   | -0.270 * | -0.48 ** | -0.174   | -0.036   | -0.156   |
| Mg    |       |       |          |        | 1.000    | 0.082  | 0.216 | -0.155 | -0.243  | 0.710 ** | 0.041    | -0.319 * | -0.244   | -0.57 ** | -0.043   | 0.260 *  | 0.095    | -0.091   |
| Fe    |       |       |          |        |          | 1.000  | 0.050 | -0.238 | 0.126   | 0.072    | 0.826 ** | 0.631 ** | 0.878 ** | 0.762 ** | 0.919 ** | 0.602 ** | 0.811 ** | 0.758 ** |
| Cu    |       |       |          |        |          |        | 1.000 | 0.188  | -0.129  | 0.591 ** | -0.020   | -0.135   | 0.011    | -0.123   | 0.012    | 0.092    | -0.026   | -0.59 ** |
| Zn    |       |       |          |        |          |        |       | 1.000  | -0.109  | -0.219   | -0.135   | -0.187   | -0.208   | -0.078   | -0.202   | -0.062   | -0.73 ** | -0.303 * |
| Mn    |       |       |          |        |          |        |       |        | 1.000   | -0.219   | 0.205    | 0.366 ** | 0.288 *  | 0.306 *  | 0.026    | -0.65 ** | 0.187    | 0.199    |
| ΣDOP  |       |       |          |        |          |        |       |        |         | 1.000    | 0.097    | -0.034   | -0.123   | -0.41 ** | -0.119   | 0.201    | 0.171    | -0.35 ** |
| Fe:N  |       |       |          |        |          |        |       |        |         |          | 1.000    | 0.612 ** | 0.734 ** | 0.666 ** | 0.746 ** | 0.406 ** | 0.617 ** | 0.653 ** |
| Fe:P  |       |       |          |        |          |        |       |        |         |          |          | 1.000    | 0.752 ** | 0.718 ** | 0.519 ** | 0.164    | 0.570 ** | 0.574 ** |
| Fe:K  |       |       |          |        |          |        |       |        |         |          |          |          | 1.000    | 0.883 ** | 0.786 ** | 0.394 ** | 0.760 ** | 0.697 ** |
| Fe:Mg |       |       |          |        |          |        |       |        |         |          |          |          |          | 1.000    | 0.767 ** | 0.292 *  | 0.587 ** | 0.694 ** |
| Fe:Ca |       |       |          |        |          |        |       |        |         |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.602 ** | 0.723 ** | 0.723 ** |
| Fe:Mn |       |       |          |        |          |        |       |        |         |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.405 ** | 0.408 ** |
| Fe:Zn |       |       |          |        |          |        |       |        |         |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.662 ** |
| Fe:Cu |       |       |          |        |          |        |       |        |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    |

\*\* Correlación significativa al 0.01

\* Correlación significativa al 0.05



Continuación cuadro A6...

|        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|        | Clr35    | Clr45    | Clr55    | Flor     | Altura   | TV       | NGV      | NVP      | PCG      | MS       | PGP      |
| N      | -0.046   | -0.033   | 0.091    | 0.147    | -0.164   | -0.031   | -0.190   | -0.228   | 0.234    | -0.176   | -0.150   |
| P      | 0.050    | -0.016   | 0.111    | 0.307*   | -0.36 ** | -0.067   | -0.264 * | -0.234   | 0.061    | -0.35 ** | 0.010    |
| K      | -0.057   | -0.008   | 0.092    | 0.168    | -0.313 * | -0.005   | -0.016   | 0.055    | 0.034    | -0.217   | 0.204    |
| Ca     | 0.060    | 0.081    | 0.540    | -0.006   | -0.261 * | 0.006    | -0.057   | -0.156   | 0.029    | -0.080   | 0.351**  |
| Mg     | -0.069   | -0.040   | 0.132    | 0.176    | -0.50 ** | -0.220   | -0.225   | -0.120   | 0.002    | -0.41 ** | -0.142   |
| Fe     | 0.267 *  | 0.380 ** | 0.229    | -0.009   | -0.33 ** | 0.228    | 0.072    | -0.108   | -0.163   | -0.38 ** | 0.005    |
| Cu     | 0.021    | -0.097   | 0.010    | 0.200    | -0.224   | -0.134   | 0.031    | -0.224   | -0.136   | -0.260 * | -0.085   |
| Zn     | -0.290 * | -0.133   | 0.030    | 0.002    | 0.194    | 0.184    | 0.171    | 0.113    | -0.189   | 0.241    | 0.031    |
| Mn     | -0.033   | 0.093    | -0.087   | -0.045   | 0.242    | 0.130    | 0.048    | 0.053    | 0.300 *  | 0.381**  | 0.096    |
| ΣDOP   | 0.030    | -0.040   | 0.037    | 0.071    | -0.38 ** | -0.265 * | -0.096   | -0.128   | -0.097   | -0.40 ** | -0.136   |
| Fe:N   | 0.229    | 0.326 ** | 0.137    | -0.112   | -0.202   | 0.219    | 0.177    | 0.005    | -0.269 * | -0.227   | 0.078    |
| Fe:P   | 0.105    | 0.257 *  | 0.017    | -0.243   | 0.072    | 0.147    | 0.213    | 0.089    | -0.125   | 0.033    | -0.025   |
| Fe:K   | 0.267 *  | 0.360 ** | 0.148    | -0.101   | -0.160   | 0.199    | 0.064    | -0.130   | -0.163   | -0.240   | -0.114   |
| Fe:Mg  | 0.228    | 0.331 ** | 0.083    | -0.133   | 0.058    | 0.344 ** | 0.202    | -0.004   | -0.136   | -0.027   | 0.079    |
| Fe:Ca  | 0.208    | 0.289 *  | 0.184    | 0.006    | -0.176   | 0.193    | 0.078    | -0.035   | -0.142   | -0.290 * | 0.158    |
| Fe:Mn  | 0.117    | 0.134    | 0.209    | 0.081    | -0.41 ** | 0.092    | 0.055    | -0.103   | -0.307 * | -0.49 ** | -0.102   |
| Fe:Zn  | 0.354 ** | 0.345 ** | 0.090    | 0.005    | -0.29 ** | -0.006   | -0.075   | -0.145   | -0.200   | -0.39 ** | -0.047   |
| Fe:Cu  | 0.193    | 0.361 ** | 0.177    | -0.097   | -0.130   | 0.255 *  | 0.023    | 0.027    | -0.061   | -0.141   | 0.033    |
| Clr35  | 1.000    | 0.810 ** | 0.510 ** | -0.141   | -0.48 ** | 0.170    | -0.178   | -0.304 * | 0.114    | -0.40 ** | -0.040   |
| Clr45  |          | 1.000    | 0.620 ** | -0.35 ** | -0.41 ** | 0.320 ** | -0.193   | -0.228   | 0.134    | -0.30 *  | -0.133   |
| Clr55  |          |          | 1.000    | -0.201   | -0.52 ** | 0.320 ** | -0.221   | -0.222   | 0.018    | -0.32 *  | -0.207   |
| Flor   |          |          |          | 1.000    | -0.018   | -0.294 * | 0.006    | 0.162    | -0.082   | -0.017   | 0.289*   |
| Altura |          |          |          |          | 1.000    | -0.133   | 0.184    | 0.504 ** | 0.134    | 0.747 ** | 0.495 ** |
| TV     |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.540 ** | 0.085    | 0.106    | 0.232    | 0.153    |
| NGV    |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.370 ** | -0.220   | 0.366 ** | 0.395 ** |
| NVP    |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | -0.219   | 0.445 ** | 0.671 ** |
| PCG    |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.241    | 0.018    |
| MS     |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.451 ** |
| PGP    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    |

\*\* Correlación significativa al 0.01

\* Correlación significativa al 0.05

Cuadro A7. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables clorosis, peso de raíz, días a floración, altura de planta, área foliar y materia seca del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”

| F.V.            | g.l. | Clorosis<br>25 días | Clorosis<br>35 días | Clorofila a | Clorofila b | Clorofila<br>total | Relación<br>Clorofila a:b | Días a<br>floración | Altura     | Peso Raíz | Area Foliar | Biomasa    |
|-----------------|------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|--------------------|---------------------------|---------------------|------------|-----------|-------------|------------|
| Bloques         | 2    | 0.0016 NS           | 0.025258 NS         | 0.05135 NS  | 0.01438 NS  | 0.0130 NS          | 0.0200 NS                 | 1.8611 NS           | 209.3 NS   | 40.17 **  | 1000258 NS  | 13.782 NS  |
| Niveles Fe      | 3    | 1.23210 **          | 0.43560 **          | 61.9170 **  | 19.0108 **  | 149.059 **         | 0.14205 **                | 185.879 **          | 8023.9 **  | 84.51 **  | 16056479 ** | 175.172 ** |
| Cultivares      | 2    | 0.084225 **         | 0.1277 **           | 15.3258 **  | 4.6431 **   | 36.585 **          | 0.05593 **                | 4607.194 **         | 85354.3 ** | 55.61 **  | 9694010 **  | 50.762 NS  |
| Niv. Fe x Cult. | 6    | 0.08482 **          | 0.1277 **           | 2.2385 **   | 0.4090 *    | 4.0707 **          | 0.11965 **                | 56.7129 **          | 1700.6 **  | 1.70 NS   | 2486182 NS  | 35.741 NS  |
| Error           | 22   | 0.0016              | 0.01010076          | 0.192207    | 0.112913    | 0.550508           | 0.006389                  | 0.830808            | 409.3      | 3.4509    | 1410047     | 15.8261    |
| C.V. %          |      | 3.37                | 9.05                | 6.7         | 8.59        | 7.1                | 4.86                      | 4.11                | 15.72      | 18.9      | 26.9        | 19.86      |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A8. Cuadros medios del análisis de varianza para contenido de nutrientes del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”

| F.V.            | g.l | N          | P          | K          | Ca         | Mg         | Fe         | Cu        | Zn         | Mn        |
|-----------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Bloques         | 2   | 0.34111 NS | 0.00840 NS | 0.01787 NS | 0.01194 NS | 0.00401 NS | 810.5 NS   | 207.6 **  | 13.98 NS   | 331.9 NS  |
| Niveles Fe      | 3   | 0.72250 NS | 0.04814 ** | 3.82085 ** | 0.06407 *  | 0.14900 ** | 11838.7 ** | 2721.3 ** | 4202.6 **  | 6393.3 ** |
| Cultivares      | 2   | 0.94777 NS | 0.00576 NS | 0.45888 ** | 0.05361 NS | 0.02350 ** | 2450.9 **  | 21.4 NS   | 10931.4 ** | 6815.8 ** |
| Niv. Fe x Cult. | 6   | 0.11555 NS | 0.00678 NS | 1.12263 ** | 0.03768 NS | 0.01983 ** | 1277.7 **  | 18.0 NS   | 344.6 NS   | 295.5 NS  |
| Error           | 22  | 0.306565   | 0.00462    | 0.047217   | 0.02073232 | 0.00341414 | 318.8      | 9.93      | 312.0      | 186.56    |
| C.V. %          |     | 11.0       | 13.37      | 7.6        | 6.1        | 7.04       | 15.5       | 9.58      | 14.8       | 18.47     |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A9. Cuadros medios del análisis de varianza para la proporción del contenido foliar de Fe con otros nutrientes del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”

| F.V.            | g.l | Fe:N        | Fe:P        | Fe:K       | Fe:Ca      | Fe:Mg       | Fe:Cu       | Fe:Zn      | Fe:Mn       |
|-----------------|-----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Bloques         | 2   | 9.8243 NS   | 11511.5 *   | 79.3363 NS | 146.59 NS  | 1360.1 NS   | 13.56947 ** | 0.13743 NS | 0.031811 NS |
| Niveles Fe      | 3   | 599.7026 ** | 80814.23 ** | 5105.77 ** | 2273.85 ** | 20534.24 ** | 67.00097 ** | 1.23977 ** | 9.6759 **   |
| Cultivares      | 2   | 164.241 **  | 11162.27 *  | 159.96 NS  | 470.85 **  | 7073.22 **  | 6.3355 NS   | 0.3785 **  | 5.9338 **   |
| Niv. Fe x Cult. | 6   | 47.0226 NS  | 12976.7 **  | 758.18 **  | 201.12 *   | 1558.16 NS  | 1.540506 NS | 0.14318 NS | 1.110308 NS |
| Error           | 22  | 19.45396    | 2473.76     | 65.6805    | 69.33598   | 755.1108    | 2.039547    | 0.056778   | 0.51687     |
| C.V. %          |     | 18.8        | 20.7        | 17.8       | 17.4       | 19.2        | 31.9        | 22.93      | 35.17       |

NS No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\* Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A10. Correlaciones (Pearson) de diferentes variables medidas en el experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)”

|       | N     | P       | K       | Ca     | Mg      | Fe       | Cu       | Zn       | Mn       | Fe:N     | Fe:P     | Fe:K     | Fe:Mg    | Fe:Ca    | Fe:Mn    | Fe:Zn    | Fe:Cu    | ΣDOP     |       |
|-------|-------|---------|---------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| N     | 1.000 | -0.37 * | -0.103  | 0.115  | -0.234  | -0.249   | 0.256    | -0.302   | -0.244   | -0.54 ** | -0.145   | -0.202   | -0.259   | -0.323   | -0.292   | -0.171   | -0.017   | -0.036   |       |
| P     |       | 1.000   | 0.47 ** | 0.221  | 0.337 * | -0.54 ** | -0.336 * | 0.209    | 0.383 *  | -0.45 ** | -0.74 ** | -0.57 ** | -0.55 ** | -0.54 ** | -0.496   | -0.63 ** | -0.090   | -0.271   |       |
| K     |       |         | 1.000   | -0.004 | 0.057   | -0.52 ** | 0.096    | 0.074    | 0.42 **  | -0.50 ** | -0.56 ** | -0.81 ** | -0.407 * | -0.49 ** | -0.630** | -0.55 ** | -0.322   | -0.004   |       |
| Ca    |       |         |         | 1.000  | 0.54 ** | -0.095   | -0.402   | 0.334 *  | 0.270    | -0.228   | -0.077   | 0.008    | -0.309   | -0.275   | -0.229   | -0.261   | 0.218    | -0.144   |       |
| Mg    |       |         |         |        | 1.000   | -0.143   | -0.76 ** | 0.290    | 0.335 *  | -0.186   | -0.132   | 0.021    | -0.51 ** | -0.236   | -0.259   | -0.223   | 0.376 *  | -0.41 *  |       |
| Fe    |       |         |         |        |         | 1.000    | -0.020   | 0.169    | -0.207   | 0.94 **  | 0.94 **  | 0.86 **  | 0.911 ** | 0.981 ** | 0.445**  | 0.622 ** | 0.573 ** | -0.237   |       |
| Cu    |       |         |         |        |         |          | 1.000    | -0.50 ** | -0.50 ** | 0.032    | 0.035    | -0.131   | 0.266    | 0.048    | 0.357*   | 0.284    | -0.72 ** | 0.81 **  |       |
| Zn    |       |         |         |        |         |          |          | 1.000    | 0.74 **  | 0.147    | 0.073    | 0.005    | 0.042    | 0.108    | -0.525** | -0.61 ** | 0.415 *  | -0.69 ** |       |
| Mn    |       |         |         |        |         |          |          |          | 1.000    | -0.257   | -0.257   | -0.36 *  | -0.266   | -0.240   | -0.862** | -0.65 ** | 0.258    | -0.67 ** |       |
| Fe:N  |       |         |         |        |         |          |          |          |          | 1.000    | 0.84 **  | 0.80 **  | 0.870 ** | 0.956 ** | 0.465**  | 0.583 ** | 0.495 ** | -0.201   |       |
| Fe:P  |       |         |         |        |         |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.88 **  | 0.848 ** | 0.913 ** | 0.487**  | 0.683 ** | 0.477 ** | -0.096   |       |
| Fe:K  |       |         |         |        |         |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.704 ** | 0.823 ** | 0.582**  | 0.702 ** | 0.529 ** | -0.134   |       |
| Fe:Mg |       |         |         |        |         |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.938 ** | 0.439**  | 0.602 ** | 0.338 *  | -0.064   |       |
| Fe:Ca |       |         |         |        |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.462**  | 0.642 ** | 0.511 ** | -0.216   |       |
| Fe:Mn |       |         |         |        |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.730 ** | -0.037   | 0.44 **  |       |
| Fe:Zn |       |         |         |        |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.205    | 0.298    |       |
| Fe:Cu |       |         |         |        |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | -0.69 ** |       |
| ΣDOP  |       |         |         |        |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000 |

Continuación cuadro A10...

|       | Clr25     | Clr35     | Clr45     | Flor     | Clra     | Clrb     | ClrT     | R a/b   | Praíz     | ALT      | AF        | MS       |
|-------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|---------|-----------|----------|-----------|----------|
| N     | -0.324    | -0.104    | -0.344 *  | -0.463 * | 0.319    | 0.309    | 0.317    | 0.188   | 0.452 **  | -0.099   | 0.308 *   | 0.214    |
| P     | 0.650 **  | 0.670 **  | 0.650 **  | 0.670 ** | -0.58 ** | -0.62**  | -0.59 ** | -0.301  | -0.582 ** | -0.024   | -0.445 ** | -0.46 ** |
| K     | 0.520 **  | 0.540 **  | 0.534 **  | 0.620 ** | -0.318   | -0.338*  | -0.326   | -0.313  | -0.344 *  | 0.027    | -0.358 *  | -0.389 * |
| Ca    | 0.363 *   | 0.300     | 0.246     | 0.378    | -0.36 *  | -0.338*  | -0.35 *  | -0.230  | -0.103    | -0.231   | -0.298    | -0.346 * |
| Mg    | 0.651 **  | 0.590 **  | 0.676 **  | 0.309    | -0.64 ** | -0.58**  | -0.62 ** | -0.6 ** | -0.501 ** | -0.356 * | -0.634 ** | -0.59 ** |
| Fe    | -0.610 ** | -0.530 ** | -0.610 ** | -0.343   | 0.666 ** | 0.712**  | 0.68 **  | 0.219   | 0.677 **  | 0.488 ** | 0.381 *   | 0.488 ** |
| Cu    | -0.550 ** | -0.420 *  | -0.550 ** | -0.493 * | 0.410*   | 0.373*   | 0.398 *  | 0.397*  | 0.301     | 0.133    | 0.426 **  | 0.429 ** |
| Zn    | 0.270     | 0.034     | 0.282     | 0.674 ** | -0.037   | -0.025   | -0.033   | -0.083  | 0.005     | 0.44 **  | -0.095    | -0.115   |
| Mn    | 0.489 **  | 0.261     | 0.548 **  | 0.907 ** | -0.297   | -0.280   | -0.292   | -0.243  | -0.150    | 0.239    | -0.283    | -0.298   |
| Fe:N  | -0.617 ** | -0.554 ** | -0.615 ** | -0.315   | 0.669 ** | 0.712 ** | 0.688 ** | 0.234   | 0.588 **  | 0.552 ** | 0.337 *   | 0.489 ** |
| Fe:P  | -0.615 ** | -0.538 ** | -0.613 ** | -0.080   | 0.625 ** | 0.686 ** | 0.650 ** | 0.188   | 0.707 **  | 0.322    | 0.416 *   | 0.498 ** |
| Fe:K  | -0.540 ** | -0.473 ** | -0.548 ** | -0.061   | 0.457 ** | 0.539 ** | 0.489 ** | 0.086   | 0.505 **  | 0.164    | 0.317     | 0.432 ** |
| Fe:Mg | -0.715 ** | -0.613 ** | -0.723 ** | -0.210   | 0.788 ** | 0.812 ** | 0.801 ** | 0.356 * | 0.777 **  | 0.566 ** | 0.553 **  | 0.653 ** |
| Fe:Ca | -0.638 ** | -0.551 ** | -0.626 ** | -0.250   | 0.699 ** | 0.740 ** | 0.717 ** | 0.248   | 0.670 **  | 0.529 ** | 0.421 *   | 0.533 ** |
| Fe:Mn | -0.565 ** | -0.436 ** | -0.581 ** | -0.048   | 0.336 *  | 0.308    | 0.328    | 0.372 * | 0.222     | -0.166   | 0.230     | 0.345 *  |
| Fe:Zn | -0.638 ** | -0.479 ** | -0.646 ** | -0.107   | 0.451 ** | 0.483 ** | 0.464 ** | 0.224   | 0.435 **  | -0.050   | 0.290     | 0.404 *  |
| Fe:Cu | -0.037    | -0.094    | -0.044    | 0.057    | 0.216    | 0.246    | 0.229    | -0.050  | 0.174     | 0.143    | -0.039    | -0.084   |
| ΣDOP  | -0.283    | -0.167    | -0.327    | -0.108   | 0.064    | 0.047    | 0.058    | 0.145   | 0.016     | -0.334 * | 0.222     | 0.166    |
| Clr25 | 1.000     | 0.870 **  | 0.921 **  | 0.738 *  | -0.86 ** | -0.83 ** | -0.86 ** | -0.7 ** | -0.701 ** | -0.39 *  | -0.60 **  | -0.65 ** |
| Clr35 |           | 1.000     | 0.829 **  | 0.599 ** | -0.72 ** | -0.68 ** | -0.71 ** | -0.7 ** | -0.604 ** | -0.38 *  | -0.50 **  | -0.57 ** |
| Clr45 |           |           | 1.000     | 0.663 ** | -0.85 ** | -0.82 ** | -0.83 ** | -0.6 ** | -0.716 ** | -0.367 * | -0.650 ** | -0.64 ** |
| Flor  |           |           |           | 1.000    | -0.43 ** | -0.396   | -0.418 * | -0.48 * | -0.278    | 0.282    | -0.310    | -0.391   |
| Clra  |           |           |           |          | 1.000    | 0.99 **  | 0.978 ** | 0.59 ** | 0.755 **  | 0.539 ** | 0.632 **  | 0.606 ** |
| Clrb  |           |           |           |          |          | 1.000    | .991 **  | 0.44 ** | 0.757 **  | 0.529 ** | 0.618 **  | 0.614 ** |
| ClrT  |           |           |           |          |          |          | 1.000    | 0.54 ** | 0.759 **  | 0.538 ** | 0.630 **  | 0.611 ** |
| R a/b |           |           |           |          |          |          |          | 1.000   | 0.475 **  | 0.335 ** | 0.470 **  | 0.392 *  |
| Praíz |           |           |           |          |          |          |          |         | 1.000     | 0.580 ** | 0.705 **  | 0.690 ** |
| ALT   |           |           |           |          |          |          |          |         |           | 1.000    | 0.418 *   | 0.522 ** |
| AF    |           |           |           |          |          |          |          |         |           |          | 1.000     | 0.716 ** |
| MS    |           |           |           |          |          |          |          |         |           |          |           | 1.000    |

\*\* Correlación significativa al 0.01

\* Correlación significativa al 0.05

Cuadro A11. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables clorosis, días a floración, altura de planta, área foliar y materia seca del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”

| F.V.             | Clorosis<br>25 días | Clorosis<br>35 días | Días a<br>floración | Altura<br>(cm) | Area Foliar<br>(cm <sup>2</sup> /planta) | Raíz<br>(g/planta) | Materia Seca<br>(g/planta) | Rendimiento<br>(g/planta) |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|--|--------------------|----------------------------|---------------------------|
| Bloques          | 0.00035 NS          | 0.000208 NS         | 1.6944 NS           | 98.41 NS       | 398574.9 NS                              | 18.3108 **         | 9.80074 NS                 | 37.39507 *                |
| Niveles Fe       | 1.32598 **          | 0.000255 NS         | 203.741**           | 5856.2 **      | 11898534 **                              | 73.115559 **       | 1673.866 **                | 1915.7493 **              |
| Cultivares       | 0.09837 **          | 0.000625 *          | 112.194 **          | 20153.9 **     | 9565.3 NS                                | 43.42813 **        | 1048.62 **                 | 1124.9074 **              |
| Solución x Cult. | 0.03618 **          | 0.000255 NS         | 18.7129 **          | 1731.0**       | 285835.7 NS                              | 1.680225 NS        | 82.04582 **                | 88.5175 **                |
| Error            | 0.00402247          | 0.00013258          | 0.724747            | 149.6337       | 237616.7                                 | 1.517033           | 10.8284868                 | 9.9824959                 |
| C.V. %           | 5.11                | 1.14                | 2.06                | 21.2           | 30.8                                     | 12.64              | 12.35                      | 13.71                     |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A12. Cuadrados medios del análisis de varianza para el contenido de nutrientes del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”

| F.V.             | g.l. | N          | P          | K          | Ca         | Mg         | Fe         | Cu          | Zn         | Mn        |
|------------------|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-----------|
| Bloque           | 2    | 0.37194 NS | 0.00750 NS | 0.00986 NS | 0.02583 NS | 0.00189 NS | 140.5 NS   | 13.5058 NS  | 265.09 *   | 144.61 NS |
| Niveles de Fe    | 3    | 0.34481 NS | 0.13818 ** | 1.83957 ** | 0.29518 ** | 0.02100 *  | 22186.6 ** | 991.1274 ** | 2356.93 ** | 5694.8 ** |
| Cultivares       | 2    | 0.31361 NS | 0.02394 *  | 0.10431 NS | 0.09250 NS | 0.00025 NS | 1320.1 *   | 5.9433 NS   | 1921.17 ** | 469.5 *   |
| Solución x Cult. | 6    | 0.5662 *   | 0.00915 NS | 0.05836 NS | 0.45435 ** | 0.00241 NS | 531.32 NS  | 2.5620NS    | 232.47 *   | 165.7 NS  |
| Error            | 22   | 0.216186   | 0.005239   | 0.04070    | 0.03826    | 0.003689   | 245.16     | 14.439      | 65.546     | 123.7     |
| C.V. %           |      | 9.12       | 12.4       | 6.39       | 10.2       | 12.79      | 10.52      | 11.7        | 10.7       | 10.49     |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A13. Cuadrados medios del análisis de varianza para las proporciones del contenido foliar del Fe con otros nutrientes y de la sumatoria de los índices DOP ( $\Sigma$  DOP ) del experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”

| .F.V.            | g.l. | Fe:N       | Fe:P        | Fe:K       | Fe:Ca      | Fe:Mg       | Fe:Cu      | Fe:Zn      | Fe:Mn     | $\Sigma$ DOP |
|------------------|------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-----------|--------------|
| Bloque           | 2    | 22.2401 NS | 172.67 NS   | 0.71672 NS | 53.097 NS  | 2476.79 NS  | 0.32867NS  | 0.5299NS   | 0.0052NS  | 54.759 NS    |
| Niveles de Fe    | 3    | 747.903 ** | 138242.3 ** | 3790.04 ** | 6888.85 ** | 93103.96 ** | 13.4228 ** | 9.55939 ** | 4.3359 ** | 34159.3**    |
| Cultivares       | 2    | 50.3024 NS | 1130.29 NS  | 248.01 **  | 127.01 NS  | 5038.91 NS  | 0.50553NS  | 4.93772 ** | 0.5932 ** | 2848.69NS    |
| Solución x Cult. | 6    | 16.7906 NS | 2028.01 NS  | 100.756 *  | 891.891 ** | 2222.68 NS  | 0.75214NS  | 0.78833 ** | 0.2816 ** | 508.873NS    |
| Error            | 22   | 17.52476   | 2838.877    | 36.2389    | 138.0326   | 2340.3965   | 0.67838    | 0.18575    | 0.034225  | 917.1801     |
| C.V. %           |      | 14.31      | 19.11       | 12.37      | 14.71      | 15.34       | 17.49      | 19.32      | 11.96     | 11.88        |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A14. Correlaciones (Pearson) de diferentes variables medidas en el experimento “balance nutrimental del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)”

|       | N     | P      | K      | Ca     | Mg     | Fe       | Cu        | Zn        | Mn       | Fe:N     | Fe:P     | Fe:K     | Fe:Ca    | Fe:Mg    | Fe:Mn    | Fe:Zn    | Fe:Cu    | Σ DOP     |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| N     | 1.000 | -0.044 | -0.067 | -0.086 | 0.118  | 0.298    | 0.229     | -0.278    | -0.260   | -0.046   | 0.193    | 0.253    | 0.328    | 0.237    | 0.363 *  | 0.295    | 0.034    | 0.043     |
| P     |       | 1.000  | 0.000  | -0.200 | -0.004 | -0.63 ** | -0.620 ** | 0.464 **  | 0.600**  | -0.64 ** | -0.88 ** | -0.53 ** | -0.52 ** | -0.68 ** | -0.58 ** | -0.47 ** | -0.170   | -0.44 **  |
| K     |       |        | 1.000  | 0.312  | -0.187 | -0.072   | 0.514 **  | 0.076     | -0.089   | -0.046   | -0.060   | -0.55 ** | -0.225   | 0.045    | 0.016    | -0.093   | -0.65 ** | 0.47 **   |
| Ca    |       |        |        | 1.000  | -0.157 | 0.139    | 0.314     | -0.147    | -0.192   | 0.183    | 0.140    | -0.015   | -0.42 *  | 0.261    | 0.181    | 0.186    | -0.162   | 0.257     |
| Mg    |       |        |        |        | 1.000  | 0.356 *  | -0.121    | 0.042     | -0.099   | 0.318    | 0.151    | 0.362 *  | 0.407 *  | -0.131   | 0.215    | 0.121    | 0.549 ** | -0.37 *   |
| Fe    |       |        |        |        |        | 1.000    | 0.623 **  | -0.694 ** | -0.768** | 0.94 **  | 0.88 **  | 0.86 **  | 0.829 ** | 0.87 **  | 0.920 ** | 0.85 **  | 0.535 ** | 0.381 *   |
| Cu    |       |        |        |        |        |          | 1.000     | -0.566 ** | -0.763** | 0.58 **  | 0.68 **  | 0.277    | 0.422 *  | 0.716 ** | 0.716 ** | 0.555 ** | -0.304   | 0.865 **  |
| Zn    |       |        |        |        |        |          |           | 1.000     | 0.705**  | -0.64 ** | -0.63 ** | -0.62 ** | -0.53 ** | -0.73 ** | -0.76 ** | -0.88 ** | -0.225   | -0.535 ** |
| Mn    |       |        |        |        |        |          |           |           | 1.000    | -0.71 ** | -0.73 ** | -0.60 ** | -0.61 ** | -0.77 ** | -0.90 ** | -0.73 ** | -0.155   | -0.664 ** |
| Fe:N  |       |        |        |        |        |          |           |           |          | 1.000    | 0.85 **  | 0.81 **  | 0.74 **  | 0.825 ** | 0.824 ** | 0.773 ** | 0.531 ** | 0.386 *   |
| Fe:P  |       |        |        |        |        |          |           |           |          |          | 1.000    | 0.76 **  | 0.74 **  | 0.862 ** | 0.806 ** | 0.708 ** | 0.361 *  | 0.496 **  |
| Fe:K  |       |        |        |        |        |          |           |           |          |          |          | 1.000    | 0.78 **  | 0.713 ** | 0.753 ** | 0.750 ** | 0.746 ** | 0.111     |
| Fe:Ca |       |        |        |        |        |          |           |           |          |          |          |          | 1.000    | 0.65 **  | 0.858 ** | 0.832 ** | 0.293    | 0.60 **   |
| Fe:Mg |       |        |        |        |        |          |           |           |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.726 ** | 0.634 ** | 0.551 ** | 0.213     |
| Fe:Mn |       |        |        |        |        |          |           |           |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.883 ** | 0.353 *  | 0.551 **  |
| Fe:Zn |       |        |        |        |        |          |           |           |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.424 ** | 0.483 **  |
| Fe:Cu |       |        |        |        |        |          |           |           |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | -0.426 ** |
| Σ DOP |       |        |        |        |        |          |           |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000     |



Continuación cuadro A14...

|       | Clr25     | Clr35    | Flor      | Clra      | Clrb      | ClrT      | R a/b     | Praíz     | Alt       | AF        | MS        | PGP       |
|-------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| N     | -0.200    | 0.356 *  | -0.076    | -0.284    | -0.284    | -0.296    | 0.183     | 0.176     | 0.145     | 0.058     | 0.062     | 0.140     |
| P     | 0.767 **  | 0.149    | 0.480 **  | 0.172     | 0.257     | 0.227     | -0.214    | -0.698 ** | -0.464 ** | -0.367 *  | -0.761 ** | -0.748 ** |
| K     | -0.247    | 0.157    | 0.171     | 0.490 **  | 0.283     | 0.391 *   | -0.162    | -0.002    | -0.163    | -0.026    | 0.157     | 0.027     |
| Ca    | -0.242    | 0.070    | 0.067     | 0.196     | 0.168     | 0.188     | -0.143    | 0.024     | -0.163    | 0.067     | 0.021     | 0.042     |
| Mg    | -0.143    | -0.305   | -0.262    | -0.313    | -0.073    | -0.188    | -0.102    | 0.276     | 0.165     | 0.374 *   | 0.128     | 0.123     |
| Fe    | -0.809 ** | 0.009    | -0.798 ** | -0.529 ** | -0.519 ** | -0.544 ** | 0.415 *   | 0.597 **  | 0.249     | 0.616 **  | 0.613 **  | 0.607 **  |
| Cu    | -0.785 ** | 0.184    | -0.486 ** | -0.070    | -0.293    | -0.200    | 0.312     | 0.507 **  | 0.222     | 0.328     | 0.604 **  | 0.580 **  |
| Zn    | 0.470 **  | -0.388 * | 0.702 **  | 0.477 **  | 0.580 **  | 0.555 **  | -0.521 ** | -0.208    | 0.021     | -0.285    | -0.279    | -0.294    |
| Mn    | 0.757 **  | -0.219   | 0.718 **  | 0.272     | 0.413 *   | 0.363 *   | -0.440 ** | -0.581 ** | -0.321    | -0.535 ** | -0.595 ** | -0.643 ** |
| Fe:N  | -0.780 ** | -0.110   | -0.795 ** | -0.461 ** | -0.455 ** | -0.475 ** | 0.376 *   | 0.566 **  | 0.221     | 0.633 **  | 0.629 **  | 0.593 **  |
| Fe:P  | -0.811 ** | -0.060   | -0.724 ** | -0.391 *  | -0.454 ** | -0.442 ** | 0.374 *   | 0.656 **  | 0.367 *   | 0.458 **  | 0.736 **  | 0.717 **  |
| Fe:K  | -0.544 ** | -0.081   | -0.753 ** | -0.652 ** | -0.558 ** | -0.624 ** | 0.426 **  | 0.495 **  | 0.262     | 0.538 **  | 0.420 *   | 0.483 **  |
| Fe:Mg | -0.768 ** | 0.156    | -0.704 ** | -0.372 *  | -0.481 ** | -0.449 ** | 0.466 **  | 0.495 **  | 0.187     | 0.456 **  | 0.600 **  | 0.588 **  |
| Fe:Ca | -0.653 ** | -0.083   | -0.730 ** | -0.597 ** | -0.569 ** | -0.604 ** | 0.445 **  | 0.591 **  | 0.388 *   | 0.546 **  | 0.615 **  | 0.597 **  |
| Fe:Mn | -0.777 ** | 0.219    | -0.780 ** | -0.442 ** | -0.529 ** | -0.509 ** | 0.505 **  | 0.536 **  | 0.209     | 0.523 **  | 0.517 **  | 0.545 **  |
| Fe:Zn | -0.579 ** | 0.370 *  | -0.767 ** | -0.514 ** | -0.567 ** | -0.564 ** | 0.535 **  | 0.312     | -0.035    | 0.349 *   | 0.301     | 0.312     |
| Fe:Cu | -0.170    | -0.223   | -0.450 ** | -0.586 ** | -0.342 *  | -0.470 ** | 0.214     | 0.239     | 0.115     | 0.380 *   | 0.139     | 0.171     |
| SDOP  | -0.481 ** | 0.350 *  | -0.423 *  | 0.014     | -0.267    | -0.146    | 0.366 *   | 0.216     | -0.007    | 0.022     | 0.349 *   | 0.322     |
| Clr25 | 1.000     | 0.105    | 0.557 **  | 0.229     | 0.286     | 0.271     | -0.208    | -0.804 ** | -0.476 ** | -0.652 ** | -0.840 ** | -0.800 ** |
| Clr35 |           | 1.000    | -0.094    | 0.133     | -0.0004   | 0.062     | 0.108     | -0.255    | -0.283    | -0.247    | -0.247    | -0.206    |
| Flor  |           |          | 1.000     | 0.524 **  | 0.564 **  | 0.568 **  | -0.474 ** | -0.397 *  | -0.079    | -0.483 ** | -0.441 ** | -0.359 *  |
| Clra  |           |          |           | 1.000     | 0.851 **  | 0.954 **  | -0.546 ** | -0.175    | -0.164    | -0.146    | -0.081    | -0.130    |
| Clrb  |           |          |           |           | 1.000     | 0.969 **  | -0.850 ** | -0.203    | -0.095    | -0.008    | -0.170    | -0.215    |
| ClrT  |           |          |           |           |           | 1.000     | -0.741 ** | -0.198    | -0.131    | -0.073    | -0.135    | -0.184    |
| R a/b |           |          |           |           |           |           | 1.000     | 0.162     | 0.003     | -0.079    | 0.139     | 0.224     |
| Praíz |           |          |           |           |           |           |           | 1.000     | 0.645 **  | 0.504 **  | 0.824 **  | 0.813 **  |
| Alt   |           |          |           |           |           |           |           |           | 1.000     | 0.355 *   | 0.677 **  | 0.792 **  |
| AF    |           |          |           |           |           |           |           |           |           | 1.000     | 0.571 **  | 0.532 **  |
| MS    |           |          |           |           |           |           |           |           |           |           | 1.000     | 0.908 **  |
|       |           |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 1.000     |

\*\* Correlación significativa al 0.01

\* Correlación significativa al 0.05

Cuadro A15. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables Clorosis a los 15, 30, 45 y 60 días, producción de Biomasa (materia seca) y rendimiento de grano del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.

| <b>F.V.</b>                  | <b>g.l.</b> | <b>Clorosis<br/>15 días</b> | <b>Clorosis<br/>30 días</b> | <b>Clorosis<br/>45 días</b> | <b>Clorosis<br/>60 días</b> | <b>Biomasa</b> | <b>Rnto.<br/>Grano</b> |
|------------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|------------------------|
| <b>Bloques</b>               | 2           | 0.46313 *                   | 0.407 NS                    | 0.21477 NS                  | 0.31338 NS                  | 5.682 NS       | 5.93474 NS             |
| <b>Cultivares</b>            | 2           | 0.43112 *                   | 1.421 NS                    | 2.0112 **                   | 1.46089 *                   | 105.842 *      | 639.58 **              |
| <b>Error a</b>               | 4           | 0.04093519                  | 0.397                       | 0.08651778                  | 0.102754                    | 6.3419         | 4.75674                |
| <b>Fertilizantes</b>         | 14          | 0.01891 NS                  | 0.041.NS                    | 0.0437 NS                   | 0.06848 NS                  | 9.990 **       | 14.1837 **             |
| <b>Error b</b>               | 28          | 0.01679217                  | 0.049                       | 0.06120889                  | 0.07320328                  | 3.015          | 2.62728                |
| <b>Cult. x Fertilizantes</b> | 28          | 0.00774 NS                  | 0.016 NS                    | 0.03245 NS                  | 0.013157 NS                 | 2.771 **       | 7.6066296 **           |
| <b>Error c</b>               | 56          | 0.00998955                  | 0.020                       | 0.0195404                   | 0.0153509                   | 1.3141         | 1.0595185              |
| <b>C.V %</b>                 |             | 5.67                        | 7.9                         | 8.1                         | 6.94                        | 17.66          | 9.77                   |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A16. Cuadros medios del análisis de varianza para el contenido de nutrientes del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.

| <b>F.V.</b>                 | <b>g.l.</b> | <b>N</b>   | <b>P</b>   | <b>K</b>   | <b>Ca</b>  | <b>Mg</b>  | <b>Fe</b>  | <b>Cu</b> | <b>Zn</b>  | <b>Mn</b> |
|-----------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|
| <b>Bloque</b>               | 2           | 1.25363 NS | 0.00553 NS | 0.69548 NS | 0.12305 NS | 0.06477 NS | 5922.5 NS  | 293.8 NS  | 17918.6 ** | 5935.1 NS |
| <b>Cultivares</b>           | 2           | 0.13696 NS | 0.00787 NS | 5.90387 NS | 0.16184 NS | 0.06843 NS | 176023.4*  | 1539.9 *  | 2320.0 NS  | 6167.3 NS |
| <b>Error a</b>              | 4           | 0.22074074 | 0.04557407 | 0.92832741 | 0.1486174  | 0.0143074  | 10880.0032 | 146.3905  | 935.95422  | 5951.6    |
| <b>Fertilizantes</b>        | 14          | 0.27039 NS | 0.00297 NS | 0.24583 NS | 0.02393 NS | 0.01651 NS | 3774.9 **  | 15.3 NS   | 113.5 NS   | 314.0 NS  |
| <b>Error b</b>              | 28          | 0.19545503 | 0.00357201 | 0.23489979 | 0.035921   | 0.01120487 | 692.01     | 17.58408  | 185.89363  | 595.17    |
| <b>Cultivar x Fertiliz.</b> | 28          | 0.19688 NS | 0.00297 NS | 0.31423 NS | 0.02157 NS | 0.00920 NS | 2314.4 **  | 22.9 NS   | 118.05 NS  | 452.8 NS  |
| <b>Error c</b>              | 56          | 0.21566138 | 0.00198638 | 0.252163   | 0.02135907 | 0.01247447 | 847.321238 | 29.843177 | 93.99319   | 295.22301 |
| <b>C.V. %</b>               |             | 9.76       | 10.47      | 14.57      | 6.18       | 13.73      | 20.58      | 18.83     | 18.85      | 14.28     |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A17. Cuadrados medios del análisis de varianza para las proporciones del contenido foliar del Fe con otros nutrientes y de la sumatoria de los índices DOP ( $\Sigma$  DOP ) del experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.

| <b>F.V.</b>                 | <b>g.l.</b> | <b>Fe:N</b> | <b>Fe:P</b> | <b>Fe:K</b> | <b>Fe:Ca</b> | <b>Fe:Mg</b> | <b>Fe:Cu</b> | <b>Fe:Zn</b> | <b>Fe:Mn</b> |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Bloque</b>               | 2           | 380.28 NS   | 25130.1 NS  | 546.88 NS   | 748.42 NS    | 13251.65 NS  | 4.799 NS     | 54.916 NS    | 2.7892 NS    |
| <b>Cultivares</b>           | 2           | 8503.65 **  | 832858.65 * | 10332.57 ** | 27769.06 *   | 244372.75 ** | 311.0446 **  | 61.75 NS     | 7.6945 NS    |
| <b>Error a</b>              | 4           | 449.83      | 68473.79    | 498.89      | 1548.75      | 12371.38     | 13.8079955   | 25.940859    | 2.3977289    |
| <b>Fertilizantes</b>        | 14          | 208.02 **   | 24971.81 ** | 380.73 **   | 555.128 **   | 5296.45 **   | 6.8835 NS    | 3.68 *       | 0.38078 **   |
| <b>Error b</b>              | 28          | 54.03       | 6140.24     | 89.60       | 135.99       | 1417.54      | 3.778988     | 1.510695     | 0.1323624    |
| <b>Cultivar x Fertiliz.</b> | 28          | 148.66 **   | 10201.02 ** | 270.59 **   | 401.75 **    | 3950.39 **   | 5.121339 **  | 2.0225 NS    | 0.39548 **   |
| <b>Error c</b>              | 56          | 57.65288    | 4604.463    | 112.1635    | 155.2245     | 1549.0619    | 2.8813       | 1.32832995   | 0.2155110    |
| <b>C.V. %</b>               |             | 23.13       | 20.36       | 25.5        | 20.95        | 22.54        | 31.65        | 36.5         | 37.37        |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (0.05 %).

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (0.01 %).

Cuadro A18. Correlaciones (Pearson) de diferentes variables medidas en el experimento “efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo”.

|       | N     | P     | K       | Ca       | Mg       | Fe       | Cu       | Zn       | Mn       | Fe:N     | Fe:P     | Fe:K     | Fe:Mg    | Fe:Ca    | Fe:Mn     | Fe:Zn    | Fe:Cu    |
|-------|-------|-------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| N     | 1.000 | 0.131 | 0.025   | -0.136   | 0.026    | -0.142   | -0.015   | 0.048    | 0.096    | -0.72 ** | -0.179 * | -0.127   | -0.142   | -0.124   | -0.176 *  | -0.142   | -0.120   |
| P     |       | 1.000 | 0.186 * | -0.24 ** | -0.060   | 0.236 ** | 0.022    | 0.277 ** | 0.152    | 0.200 *  | -0.042   | 0.170 *  | 0.263 ** | 0.290 ** | 0.107     | 0.097    | 0.167    |
| K     |       |       | 1.000   | 0.34 **  | 0.393 ** | 0.285 ** | 0.033    | -0.012   | 0.259 ** | 0.276 ** | 0.213 *  | -0.150   | 0.176 *  | 0.243 ** | 0.102     | 0.224 ** | 0.208 *  |
| Ca    |       |       |         | 1.000    | 0.62 **  | 0.304 ** | -0.180 * | -0.025   | -0.009   | 0.307 ** | 0.380 ** | 0.182 *  | 0.139    | 0.160    | 0.278 **  | 0.258 ** | 0.328 ** |
| Mg    |       |       |         |          | 1.000    | 0.218 *  | -0.35 ** | -0.115   | 0.119    | 0.210 *  | 0.242 ** | 0.064    | -0.073   | 0.134    | 0.137     | 0.278 ** | 0.365 ** |
| Fe    |       |       |         |          |          | 1.000    | -0.118   | 0.189 *  | 0.085    | 0.980 ** | 0.955 ** | 0.887 ** | 0.947 ** | 0.987 ** | 0.817 **  | 0.699 ** | 0.774 ** |
| Cu    |       |       |         |          |          |          | 1.000    | -0.158   | -0.137   | -0.106   | -0.146   | -0.135   | -0.025   | -0.106   | -0.072    | 0.009    | -0.65 ** |
| Zn    |       |       |         |          |          |          |          | 1.000    | 0.060    | 0.153    | 0.111    | 0.203 *  | 0.233 ** | 0.207 *  | 0.141     | -0.49 ** | 0.252 ** |
| Mn    |       |       |         |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.069    | 0.039    | -0.012   | 0.056    | 0.097    | -0.436 ** | 0.052    | 0.117    |
| Fe:N  |       |       |         |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.943 ** | 0.863 ** | 0.926 ** | 0.065 ** | 0.804 **  | 0.711 ** | 0.757 ** |
| Fe:P  |       |       |         |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.875 ** | 0.845 ** | 0.927 ** | 0.809 **  | 0.686 ** | 0.755 ** |
| Fe:K  |       |       |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.889 ** | 0.895 ** | 0.786 **  | 0.603 ** | 0.689 ** |
| Fe:Mg |       |       |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.961 ** | 0.795 **  | 0.601 ** | 0.673 ** |
| Fe:Ca |       |       |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000    | 0.798 **  | 0.678 ** | 0.755 ** |
| Fe:Mn |       |       |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 1.000     | 0.545 ** | 0.614 ** |
| Fe:Zn |       |       |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           | 1.000    | 0.466 ** |
| Fe:Cu |       |       |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |          | 1.000    |

Continuación cuadro A18...

|       | Clr15    | Clr45    | Clr60     | Clra      | Clrb      | ClrT      | R a/b     | MS        | PG        |
|-------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| N     | -0.162   | -0.142   | -0.086    | 0.122     | 0.034     | 0.093     | 0.062     | 0.017     | 0.047     |
| P     | 0.067    | 0.097    | 0.261 **  | -0.004    | 0.154     | 0.086     | -0.238 ** | -0.287 ** | -0.205 *  |
| K     | 0.266 ** | 0.324 ** | 0.290 **  | -0.344 ** | -0.023    | -0.221 *  | -0.230 ** | -0.151    | -0.265 ** |
| Ca    | 0.236 ** | 0.112    | 0.184 *   | -0.197 *  | -0.089    | -0.170 *  | -0.051    | -0.068    | -0.148    |
| Mg    | 0.048    | -0.054   | 0.115     | -0.105    | -0.207 *  | -0.182 *  | 0.113     | -0.029    | -0.101    |
| Fe    | 0.411 ** | 0.427 ** | 0.463 **  | -0.448 ** | -0.018    | -0.281 ** | -0.328 ** | -0.424 ** | -0.674 ** |
| Cu    | -0.145   | 0.020    | -0.236 ** | 0.105     | 0.415 **  | 0.302 **  | -0.409 ** | 0.266 **  | 0.220 *   |
| Zn    | 0.398 ** | 0.175 *  | 0.472 **  | -0.086    | 0.293 **  | 0.117     | -0.364 ** | -0.244 ** | -0.254 ** |
| Mn    | 0.137    | 0.139    | 0.293 **  | -0.287 ** | -0.234 ** | -0.308 ** | 0.018     | -0.154    | -0.341 ** |
| Fe:N  | 0.408 ** | 0.432 ** | 0.450 **  | -0.447 ** | -0.021    | -0.281 ** | -0.324 ** | -0.403 ** | -0.646 ** |
| Fe:P  | 0.387 ** | 0.381 ** | 0.382 **  | -0.436 ** | -0.083    | -0.310 ** | -0.231 ** | -0.351 ** | -0.628 ** |
| Fe:K  | 0.304 ** | 0.266 ** | 0.343 **  | -0.290 ** | -0.008    | -0.179 *  | -0.228 ** | -0.363 ** | -0.570 ** |
| Fe:Mg | 0.399 ** | 0.436 ** | 0.436 **  | -0.417 ** | 0.039     | -0.228 ** | -0.353 ** | -0.414 ** | -0.656 ** |
| Fe:Ca | 0.390 ** | 0.419 ** | 0.457 **  | -0.433 ** | -0.007    | -0.265 ** | -0.327 ** | 0.428 **  | -0.679 ** |
| Fe:Mn | 0.336 ** | 0.310 ** | 0.281 **  | -0.250 ** | 0.075     | -0.107    | -0.263 ** | -0.323 ** | -0.429 ** |
| Fe:Zn | 0.092    | 0.228 ** | 0.132     | -0.303 ** | -0.146    | -0.267 ** | -0.115    | -0.212 *  | -0.400 ** |
| Fe:Cu | 0.387 ** | 0.359 ** | 0.488 **  | -0.412 ** | -0.240 ** | -0.387 ** | -0.027    | -0.427 ** | -0.595 ** |
| Σ DOP | -0.180 * | 0.008    | -0.319 ** | 0.039     | 0.143     | 0.106     | -0.158    | 0.360 **  | 0.343 **  |
| Clr15 | 1.000    | 0.663 ** | 0.724 **  | -0.559 ** | 0.048     | -0.309 ** | -0.413 ** | -0.159    | -0.464 ** |
| Clr45 |          | 1.000    | 0.625 **  | -0.788 ** | -0.087    | -0.525 ** | -0.399 ** | -0.157    | -0.475 ** |
| Clr60 |          |          | 1.000     | -0.564 ** | -0.010    | -0.345 ** | -0.382 ** | -0.443 ** | -0.617 ** |
| Clra  |          |          |           | 1.000     | 0.439 **  | 0.855 **  | 0.180 *   | 0.263 **  | 0.511 **  |
| Clrb  |          |          |           |           | 1.000     | 0.841 **  | -0.740 ** | 0.158     | 0.131     |
| ClrT  |          |          |           |           |           | 1.000     | -0.318 ** | 0.249 **  | 0.383 **  |
| R a/b |          |          |           |           |           |           | 1.000     | 0.049     | 0.250 **  |
| MS    |          |          |           |           |           |           |           | 1.000     | 0.559 **  |
| PG    |          |          |           |           |           |           |           |           | 1.000     |

\*\* Correlación significativa al 0.01

\* Correlación significativa al 0.05



## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Generalidades Sobre la Disponibilidad del Hierro (Fe)

Prácticamente todos los suelos del mundo tienen una alta cantidad de hierro, pero no todas las formas son asimilables. En el suelo se encuentra en forma trivalente (oxidada,  $\text{Fe}^{+3}$ ), divalente (reducida,  $\text{Fe}^{+2}$ ) y como hidróxidos ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ;  $\text{FeOH}_3$ ).

La planta puede absorber el Fe en forma oxidada ( $\text{Fe}^{+3}$ , férrica) o reducida ( $\text{Fe}^{+2}$ , ferroso), siendo la forma ferrosa (Fe II) la más disponible para la absorción por la planta. EL Fe (II) total inorgánico en solución varía con el pH y alcanza un mínimo entre pH 6.5 y 8.0 (Loué, 1988).

Entre los principales cultivos de explotación extensiva que presentan problemas nutricionales de deficiencia de hierro son: durazno, cítricos, manzano, vid, aguacate, plátano, fresa, cucurbitáceas, solanáceas, cacahuete, maíz, sorgo, chícharo, frijol y soya.

Mengel y Kirkby (1983) indican que dentro de la planta en la raíz el hierro es incorporado a citrato de hierro, de tal manera que en el xilema se encuentra gran cantidad de citrato de hierro o hierro inorgánico. El hierro que no se aprovecha se puede retraslocar vía floema, pero su movilidad es baja por lo que se presentan primero las deficiencias en tejidos nuevos.

### 2.2. Causas de la Clorosis por Deficiencia de Hierro

La deficiencia de hierro en las plantas puede ser causada por varios factores que intervienen en la absorción, traslocación y asimilación del nutrimento. Las causas más comunes de clorosis férrica son:



- Baja disponibilidad del elemento en el suelo.
- Antagonismo con metales pesados como el Zn, Cu y Mn.
- Niveles altos de Fósforo.
- En suelos calcáreos, niveles altos de  $\text{HCO}_3^-$ .
- pH, alcalino.
- Elevado Potencial Redox ( $E_h = + 700 \text{ mv}$ ). Oxidación de  $\text{Fe}^{+2}$  a  $\text{Fe}^{+3}$ .
- Plantas Fe ineficientes (cultivos susceptibles).
- Baja capacidad reductora de la raíz.
- Algunos microorganismos que atacan la raíz pueden causar clorosis férrica como son la *Rizoctonia solani* o el *Fusarium solani*.

### **2.3. Daños Causados por la Clorosis Férrica**

Los síntomas de deficiencia férrica se pueden deber a mala absorción del nutrimento por las raíces, a la no traslocación del nutrimento dentro de la planta o la falta de utilización en el metabolismo de la planta (asimilación). La clorosis férrica no siempre se debe a una deficiencia absoluta de Fe, puede ocurrir que existan contenidos relativamente altos de Fe en las hojas y que éstas presenten clorosis, lo que se explica considerando que parte de este Fe es inactivo (Mengel y Geurtzen, 1986).

Los síntomas más comunes son el amarillamiento de las hojas jóvenes, total o parcialmente, mientras que los nervios permanecen verdes (Bidwell, 1979); clorosis del tejido joven de la parte apical y de las yemas recién reventadas; clorosis intervenal a total en tejido joven. En condiciones extremas, se produce amarillamiento general, necrosis marginal y moteado de color café cobrizo, necrosis de las hojas que puede llegar a la muerte del meristemo apical, cese total de crecimiento y muerte de la planta (Romera y Díaz, 1991).

## 2.4. Estrategias de Adaptación a Deficiencias de Hierro

Las plantas responden diferencialmente a las condiciones de fertilidad de los suelos y a la concentración de nutrimentos en sus tejidos, presentando en ocasiones alteraciones en el “patrón normal” de crecimiento y en su fase reproductiva por cambios en procesos tales como fotosíntesis y respiración (Yañez, 1987).

Desde un enfoque nutricional las plantas pueden clasificarse como eficientes, normales e ineficientes para la toma y utilización de los nutrimentos (Chaney, 1988), los niveles de ineficiencia pueden ser en la absorción, translocación y/o utilización.

Galván (1985) resume los mecanismos de respuesta a la tensión férrica:

- a) Acidificación del medio.
- b) Excreción de sustancias reductoras (ácido cafeico fenoles ortohidroxilos).
- c) Mayor concentración de ácidos orgánicos (citratos).
- d) Eficiencia enzimática.
- e) Movilidad dentro de la planta.
- f) Utilización eficiente.

Los mecanismos que favorecen la absorción de Fe pueden ser no específicos o específicos, también denominados respuestas a la deficiencia de Fe (Romheld y Marschner, 1986). Dentro de los mecanismos no específicos se encuentran: a) la acidificación debida a absorción preferente de cationes, b) liberación de compuestos orgánicos por las raíces (alto peso molecular: mucilago; bajo peso molecular: azúcares, ácidos orgánicos “cítrico y málico”, aminoácidos y fenoles), c) Microorganismos, d) Contacto entre las raíces y las partículas del suelo.

Los mecanismos específicos (respuestas), se ponen en marcha sólo cuando la planta detecta falta de Fe (Romera y Díaz, 1991). Entre estos mecanismos están los

siguientes: a) acidificación del sustrato de cultivo, b) incremento de la capacidad reductora, c) liberación de fenoles (ácido cafeico, ácido fenólico, ácido clorogénico), d) Incremento de la síntesis de ácidos orgánicos (ácido cítrico y málico), e) cambios morfológicos en la raíz (inhibición en el alargamiento de las raíces, acompañada por el desarrollo de raíces laterales, en las zonas subapicales se originan engrosamientos de tonalidad amarillenta, donde proliferan los pelos radicales y las células transferentes).

En la actualidad se consideran dos diferentes caminos o estrategias asociadas con diferentes tipos de plantas por las cuales pueden incrementar la disponibilidad del hierro en el suelo (Romheld and Marschner, 1986; Romheld, 1987 y Bienfait, 1988):

**La estrategia I.** Presente en las dicotiledóneas (judía y soya) y monocotiledóneas no gramíneas (girasol, pepino, ajo y cebolla), gimnospermas, helechos y algas. Se caracteriza por decrecer el pH en la rizósfera por excreción de iones hidrógeno ( $H^+$ ); la solubilización de iones férricos y quelatos férricos, por una activación del sistema reductor en el plasmalema de las células de la epidermis de la raíz y liberar fenoles.

**La estrategia II.** Asociada con gramíneas (como pastos, trigo, cebada, maíz y sorgo), hongos y bacterias, se basa en la liberación por las raíces de fitosideróforos (gramíneas) y sideróforos (hongos y bacterias) que pueden solubilizar iones férricos con el cual forman quelatos.

En cuanto a la estrategia II, investigadores japoneses identificaron una familia de compuestos interrelacionados excretados por pastos con deficiencia de Fe. Estos son llamados fitosideroforos, p.ej. ácido mugineico, todos son buenos quelatores de iones férricos y son relacionados a la nicotinamina, la cual es un transportador ferroso en la planta, operando sobre cortas distancias (Chaney, 1988). La nicotinamina ha sido encontrada en todas las plantas superiores, pero solamente los pastos han mostrado la excreción de fitosideroforos. Sin embargo, no se conoce porque las dicotiledóneas no han desarrollado o perdido esta capacidad. Chaney (1988) describe a los fitosideroforos

como compuestos biosintetizados por las plantas que sirven como un Fe-ionoforo (pasa la membrana hacia dentro de la célula como quelato de hierro intacto) para la planta. El mismo autor menciona que Takagi sugirió que para uso general se les llame a los compuestos, familia de ácidos mugineico (ácido mugineico, MA; ácido 2'-dioxy mugineico, DMA; ácido 3-hidroxi- y 3-epi-hidroxy-mugineico, HMA; y ácido avenico).

#### **2.4.1. El pH de la rizósfera en la absorción de hierro**

Los aspectos del suelo más sobresalientes de los problemas de asimilabilidad de los microelementos son: el pH, la materia orgánica, la textura, la actividad microbiana, el régimen hídrico y el drenaje, y las condiciones de oxidorreducción (Loué, 1988). El aumento del pH reduce la solubilidad y absorción de Al, Co, Cu, Fe, Zn y más particularmente Mn, aumentando la del Mo. Parece que el efecto del pH es más importante sobre la asimilación de los microelementos aportados que sobre aquella de los microelementos presentes naturalmente en el suelo.

La cantidad de hierro asimilable en el suelo varía principalmente con el pH del mismo, cuando hay gran alcalinidad (pH alto) la forma férrica tiende a formar hidróxidos férricos  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , que precipitan haciéndose insoluble (Rodríguez, 1982). Esto ocurre en suelos con alto contenido de calcio, produciéndose en las plantas una severa clorosis.

En suelos ácidos, regularmente la concentración del hierro es mayor como sesquióxidos hidratados, los cuales no son aprovechables por la planta. Se puede afirmar que los óxidos e hidróxidos de Fe (III) juegan un papel primordial para la solubilidad y la disponibilidad de Fe, su solubilidad decrece a pH mayores de 6.

Las raíces absorben al Fe en la forma de  $\text{Fe}^{2+}$  (ferrosa) y en cierta medida en forma quelatada. La absorción de Fe inorgánico está por lo tanto ligada a la capacidad que tienen las raíces de reducir en la rizósfera el pH y reducir el  $\text{Fe}^{3+}$  en  $\text{Fe}^{2+}$ . La liberación del  $\text{H}^+$  por las raíces reduce el pH de la zona radicular y favorece la

solubilidad de  $\text{Fe}^{3+}$ , la quelación y la reducción a  $\text{Fe}^{2+}$ . La acidificación de la rizósfera es una respuesta debido a la extrusión de iones hidrógeno por la ATPasa del plasmalema, la actividad se localiza en los extremos de la raíz (Landsberg, 1982). La inhibición de la absorción de Fe puede ser afectada por el pH, pues la reductasa tiene un pH óptimo de funcionamiento entre 4 y 6 (Olsen y Brown, 1980).

Las especies de plantas que pueden incrementar la excreción de iones hidrógeno bajo deficiencia de Fe tienen gran efectividad contra el bicarbonato, la rizósfera puede ser acidificada en suelos calcáreos.

Bienfait (1988) encontró que la excreción de iones hidrógeno se asoció cercanamente a la fijación de  $\text{CO}_2$  durante el ciclo de acidificación inducido por deficiencia de hierro en raíces de frijol.

La acidificación de la rizósfera por las células epidérmicas (pelos radicales) Fe estresados es un proceso determinante en las plantas resistentes a clorosis (Chaney, 1988).

La acidificación se localiza en las zonas subapicales de la raíz, en contraste con la acidificación generalizada, a lo largo de la raíz, que ocurre por la absorción preferente de cationes. La acidificación favorece la solubilización del Fe y el funcionamiento de la reductasa, que posee un pH óptimo entre 4 y 5 (Marschner, 1986).

Las membranas de las raíces son las partes críticas de la respuesta a la deficiencia de hierro, y solamente las células de la epidermis en las partes jóvenes de las raíces son activas (menos de tres centímetros de la extremidad de la raíz). Se observan cambios en la morfología de la raíz, como mayor producción de raicillas y pelos radicales y un incremento en la superficie de absorción de las raíces.

El control de las reacciones a la respuesta de una deficiencia de hierro, no se localiza exclusivamente en la raíz (Bienfait, 1988). Las hojas cloróticas podrían mandar una señal a las raíces induciéndolas a desarrollar una reacción, solamente las raíces de variedades eficientes podrían ser capaces de captar e interpretar la “señal de clorosis”.

Landsberg (1982) aplicó sobre las hojas de girasol ácido triiodobenzoico (inhibidor del transporte de auxinas) y observó que no hubo excreción de iones hidrógeno por la raíz, concluyendo que una hormona podría estar envuelta en el control de la excreción de iones hidrógeno.

Bienfait (1988) encontró que aparentemente una conexión del floema con las raíces y el origen de fotosintatos son esenciales para la excreción de iones hidrógeno. Utilizando raíces de tubérculos de papa, cortando los brotes, para observar si eran capaces de desarrollar reacciones Fe eficientes, con un suplemento de fotosintatos vía floema, pero sin ninguna señal de clorosis. Las raíces pudieron desarrollar y expresar todas las reacciones conocidas de Fe-eficientes. Y, concluye que las raíces poseen todo el aparato para regular y desarrollar reacciones de Fe-eficiencia.

En esta conclusión, no se excluye un posible rol de los brotes, debido a que los brotes pueden influenciar el *status quo* del Fe en la raíz vía transporte en el floema. Las raíces contienen el aparato para controlar y desarrollar las reacciones conocidas de las plantas Fe-eficientes. Por otra parte, hay indicadores que los brotes podrían poseer al menos dos medios para ejercer influencia:

1. A través del Fe del floema, sobre el estado del Fe en la raíz. Esto podría determinar el desarrollo del aparato de Fe-eficiencia.

2. A través del azúcar del floema, sobre el rango de excreción de protones, e indirectamente, vía formación de cítrato, sobre la capacidad de la turbo reductasa.

#### 2.4.1.1 Efecto del balance de absorción de cationes y aniones en la absorción del hierro

La capacidad de las plantas de acidificar la rizósfera como respuesta a la deficiencia férrica puede depender fuertemente del balance de absorción de cationes-aniones en su metabolismo (Bienfait, 1988); a esta respuesta se le considera como un mecanismo no específico (Romheld y Marschner, 1986). Los pastos como las dicotiledóneas son capaces de cambiar su balance de absorción de iones a patrones más ácidos sobre deficiencia de hierro.

Chaney (1988) demostró la importancia del K en mantener altos rangos de acidificación (es necesario para incrementar la actividad de la H<sup>+</sup>-ATPasa inducida por el estrés de Fe). El K de la raíz es fuertemente incrementado en plantas con estrés de Fe con K en solución, pero el K de los brotes no cambia. Esto refuerza el modelo de la síntesis de ácidos orgánicos, para generar excreción de iones hidrógeno y almacenando su K en vacuolas, debido a que el análisis foliar no indica algún cambio en el K, el análisis de raíz será necesario para investigaciones futuras.

#### **2.4.2. Sistema reductor de la epidermis de las células de la raíz**

Los mecanismos de la toma de Fe y traslocación, para los cultivos con la estrategia 1 incluyen: transportadores reductores a través de las membranas, transportadores de hierro ferroso en las membranas, H<sup>+</sup>-ATPasa en la membrana, incremento en citrato del citoplasma, excreción de ácido cafeínico u otros reductantes y excreción de flavinas (Chaney, 1988).

Para explicar el proceso de la reducción del hierro, tradicionalmente, se han considerado dos hipótesis (Romera y Díaz, 1991):

1. La reducción ocurre en el exterior de las raíces mediante sustancias reductoras, principalmente fenoles, que excretan las raíces bajo condiciones de deficiencia de Fe (Olsen y Brown, 1980).
2. La reducción se lleva a cabo en la superficie de las raíces mediante una enzima reductasa, localizada en la cara externa de células de la epidermis (Chaney *et al*, 1972).

En las membranas de las células de las plantas podrían existir dos diferentes sistemas redox: (Bienfait, 1988).

1. Sistema estándar, capaz de reducir solamente ferrocianida, presente en todas las células, sin relación con la absorción de Fe. La función del sistema estándar no es conocido pero debe tener algún propósito.
2. Sistema turbo (así nombrado porque alcanza rangos altos en raíces) capaz de reducir una variedad de quelatos férricos, e inducida por una escasez de Fe en las células de la epidermis de la raíz. Su función es producir iones ferrosos para su absorción.

Las características de los dos sistemas para el transporte de electrones a través del plasmalema en las plantas se presentan en el Cuadro 1.

Bienfait (1988) indica que la formación de células transfer se induce en las capas de células de la epidermis de la raíz de plantas deficientes en Fe. Romheld and Kramer en 1983 encontraron una correlación positiva entre la capacidad de las especies de las plantas para bajar el pH de la solución nutritiva y la presencia de estas células. Este descubrimiento sugiere la presencia de células transfer como prerequisite para la acidificación de la rizósfera.

En los quelatos de Fe solubles, la absorción de la molécula entera resulta muy lenta. El  $\text{Fe}^{3+}$  debe ser reducido a  $\text{Fe}^{2+}$  y separarse del quelato en la superficie de la raíz antes de ser absorbido (Bienfait, 1988). En general un buen quelato férrico es un débil quelato de iones ferrosos, después de la reducción el enlace entre el ión ferroso y el



quelato es demasiado débil, así el ión ferroso es rápidamente disociado y absorbido, sin el quelato.

Cuadro 1. Características de los sistemas para el transporte de electrones a través del plasmalema de las células de las plantas.

| CARACTERÍSTICA      | SISTEMA ESTÁNDAR        | SISTEMA TURBO                    |
|---------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Distribución        | Todas las plantas       | Todas las plantas excepto pastos |
| Localización        | En toda la planta       | Epidermis de raíces jóvenes      |
| Activo con:         | Ferrocianida            | Quelatos férricos y ferrocianida |
| Aceptor natural     | Desconocido             | Quelatos férricos                |
| Donador de electrón | NADPH<br>(posible NADH) | NADPH                            |
| Función             | Desconocida             | Absorción de hierro.             |

Sijmons *et al.* (1984) encontraron que las raíces jóvenes de frijol aparentemente usan el NADPH para reducir la ferrocianida extracelular y solamente existe un incremento de NADPH por deficiencia de hierro, fuertes evidencias muestran que solamente las células de la epidermis y especialmente los pelos absorbentes sometidos a la deficiencia de Fe inducen grandemente el incremento en la capacidad de reducción de  $Fe^{+3}$ .

Bienfait *et al.* (1983) indican que raíces de frijol con suficiente Fe mantenidas a un pH de 3.5 excretaron más compuestos reductores férricos que las raíces con deficiencia de Fe mantenidas a un pH de 6, mientras la capacidad reductora de quelatos férricos de las raíces con deficiencia de Fe fue 20 veces más alta.

Bienfait (1988) demostró que cuando las raíces acumulan citrato en paralelo con una más o menos pronunciada extrusión activa de hidrógenos, al mismo tiempo se construye la capacidad para reducir el  $NADP^+$ . La actividad de la turbo reductasa, medida inmediatamente después del ciclo de acidificación, fue positivamente

correlacionada al decremento del pH ocurrido en la solución nutritiva. El mismo autor estudio la actividad de la estándar y turbo reductasa en raíces de frijol y cebada desarrolladas con y sin Fe. Los rangos de reducción de ferrocianida se midieron con 0.5 mM ferrocianida en 0.5 mM CaSO<sub>4</sub>, 5mM MES a un pH de 5.5, el cual produjo la V<sub>máx.</sub> Los rangos de reducción de Fe-EDTA se midieron con 0.1 mM Fe-EDTA, 0.4 mM BPDS, 0.5 mM CaSO<sub>4</sub> y 5 mM MES a un pH de 5.5; la V<sub>máx.</sub> se calculó sobre la base de K<sub>m</sub> para Fe-EDTA siendo 0.12 mM:

| Substrato    | Actividad        | Frijol |     | Cebada |     |
|--------------|------------------|--------|-----|--------|-----|
|              |                  | +Fe    | -Fe | +Fe    | -Fe |
| Ferrocianida | Estándar + Turbo | 3.7    | 7.5 | 3.8    | 3.8 |
| Fe-EDTA      | Turbo            | 0.5    | 5.0 | 0.1    | 0.1 |

#### 2.4.3. Los ácidos orgánicos y la liberación de fenoles en la absorción del hierro

Los compuestos excretados por la raíz podrían también acidificar la solución del suelo, pero su contribución es probablemente insignificante en comparación con la excreción de iones hidrógeno (Bienfait, 1988). El mismo autor señala que la excreción de iones hidrógeno por las raíces está asociada a la producción de ácidos orgánicos, principalmente citrato y malato.

Landsberg (1986) encontró incrementos del nivel de PEP carboxilasa en raíces deficientes en Fe, sugiriendo un incremento en la capacidad de producir malato y citrato, en lugar de un decremento en la capacidad para oxidar citrato. Es importante notar que los pastos acumulan citrato y malato en deficiencia de Fe, pero no excretan iones hidrógeno (Bienfait, 1988). En general las plantas superiores incrementan su capacidad de formar ácido cítrico y ácido málico como una reacción de escasez de Fe; pero solo las dicotiledóneas y las monocotiledóneas (sin incluir los pastos) podrían asociarse con una significativa excreción de iones hidrógeno.

La deficiencia de Fe podría causar que la raíz exudara compuestos reductores de Fe, tales como los fenoles, los cuales pueden acumularse en la raíz.

Bienfait (1988) dice que algunos investigadores mostraron que la deficiencia de Fe podría causar que la raíz exude compuestos reductores de Fe, tales como los fenoles, los cuales se pueden acumular en la raíz.

Chaney (1988) menciona que la excreción de ácido cafeínico podría reducir (solubilizar) el Fe del suelo, pero es demasiado débil como quelato de  $\text{Fe}^{+3}$  para servir como una ligadura útil en la solución de suelos alcalinos ricos en calcio y magnesio. El mismo autor indica que las membranas de las raíces son las partes críticas de la respuesta al Fe-estrés, además solamente las células de la epidermis en las partes jóvenes de las raíces son activas, menos de tres centímetros de la extremidad de la raíz.

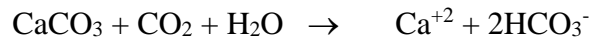
#### **2.4.4. Efecto del bicarbonato en la absorción del hierro**

Como casi dos terceras partes del territorio nacional esta constituida por suelos calcimórficos, es importante enfocar a la clorosis férrica causada por altos contenidos de bicarbonatos en suelos calcáreos.

En los suelos calcáreos, cuyo pH oscila entre 7.4 y 8.5, la solubilidad del Fe inorgánico está alrededor de  $10^{-10}$  M, concentración insuficiente si se considera que los niveles críticos para las plantas se sitúan por encima de  $10^{-7}$  M.

Chaney (1988) menciona que el bicarbonato induce clorosis en cultivos susceptibles a clorosis como la soya. Por otra parte Loué (1988) indica que en suelos calcáreos el hierro no es asimilable debido a las siguientes reacciones:

Suelos con altos niveles de  $\text{CaCO}_3$ :



Al tener una buena aireación del suelo, se reduce el nivel de  $\text{CO}_2$  y la producción de  $\text{HCO}_3^-$ , y por tanto se reduce la clorosis férrica. El pH elevado en suelos calcáreos se mantiene fundamentalmente por la capacidad tampón del bicarbonato y carbonatos del suelo. Romera y Díaz (1991) consideran que el bicarbonato, aparte de inhibir la absorción del Fe, contribuye a su inactivación dentro de la planta.

Chaney (1988) indica que encontró que las especies de plantas que pueden incrementar la excreción de iones hidrógeno bajo deficiencia de Fe tienen gran efectividad contra el bicarbonato, la rizósfera puede ser acidificada en suelos calcáreos.

#### **2.4.5. La humedad del suelo en la disponibilidad del hierro**

Desde un punto de vista microbiológico en condiciones de reducción (inundación) se ha concluido que se presentan incrementos en las cantidades de fósforo, calcio, magnesio, hierro y manganeso soluble, sobre todo cuando se encuentra presente materia orgánica en proceso de descomposición (Vergara, 1992).

Loué (1988) indica que las condiciones de oxidación y de reducción intervienen en la asimilabilidad de Fe y Mn. La escasa asimilabilidad de Fe y de Mn en las condiciones del medio favorables a la oxidación se debe fundamentalmente a la menor solubilidad de las formas trivalentes con relación a la de las formas divalentes reducidas. Las condiciones reductoras generadas por una cantidad de agua elevada del suelo puede también aumentar la asimilabilidad de Cu, Zn, Mo, Co.

Vergara (1992) menciona que los suelos aireados tienen un potencial redox (Eh) característico que oscila en un rango de +700 a +400 milivolts (mv) y los inundados de -250 a -300 mv. Los valores Eh bajos pueden dañar por sí mismos las raíces. Valores de

Eh del suelo menores a 150 mv son dañinos y valores mayores a 300 mv son benéficos. La concentración de hierro ferroso y manganeso manganeso varía en los suelos inundados de 0.07 a 6600 ppm y de 1 a 100 ppm respectivamente. El mismo autor indica que en condiciones de inundación hay un decremento en las bacterias aerobias y una estimulación paralela de anaerobias, entre estas últimas se encuentran los géneros *Cromobacterium*, *Agrobacterium*, *Clostridium* y *Bacillus*. Los microorganismos anaerobios tienen algunas acciones benéficas para el cultivo, entre las cuales se cuenta: fijación de nitrógeno, solubilidad y reducción de compuestos de hierro, azufre y fósforo y producción de sulfuros.

En suelos inundados, donde la disponibilidad de oxígeno es baja, iones ferrosos pueden encontrarse en altos niveles, el ión ferroso es fácilmente tomado por las raíces, y cuando los niveles del ión ferroso son altos, puede ocurrir toxicidad (Bienfait, 1988). El ión ferroso puede ser oxidado a férrico, el cual precipita como hidróxido férrico en los espacios libres y sobre la superficie de las raíces. En suelos que tienen buen drenaje, la mayor parte del hierro está en el grado más alto de oxidación y sólo se encuentran pequeñas cantidades del ión ferroso (Alexander, 1980). Si el suelo se anegara o se sujetara a anaerobiosis por otro medio su contenido en hierro ferroso aumentaría rápidamente. Este proceso es casi completamente el resultado de agentes biológicos, ya que ocurre muy poco o ningún cambio en suelo estéril inundado.

El incremento de la concentración de hierro ferroso hidrosoluble es un beneficio importante en suelos inundados donde se cultiva arroz, ya que no solo elimina las deficiencias de hierro en esos suelos, sino también elimina la toxicidad del manganeso en suelos ácidos.

Los *gleissoles* son comunes donde los regímenes de agua son altos y tales horizontes se asocian característicamente con lugares inundados. El color gris de la zona gleizada se atribuye al sulfuro ferroso producido bajo anaerobiosis por la reacción de los productos finales de la reducción microbiana del sulfato y el hierro (Alexander, 1980).

En los lugares gleizados que han sido investigados, los reductores de hierro aerobios y anaerobios facultativos más importantes son *Bacillus* y *Pseudomonas*.

El contenido de las plantas en microelementos registra importantes variaciones estacionales y anuales que pueden ser debidas en parte a los efectos de la asimilabilidad de los microelementos (Loué, 1988). En principio las temperaturas elevadas del suelo se ven acompañadas de una absorción más intensa de microelementos pero en general van seguidas de una insuficiencia de agua en el suelo, la sequía conduce a una baja asimilabilidad.

## **2.5. Características de Cultivares Seleccionados para Absorción de Hierro en Condiciones de Baja Disponibilidad**

Yáñez (1987) menciona que existe variación genética en poblaciones naturales y en plantas cultivadas, en cuanto a su capacidad en la absorción, traslocación y utilización de nutrimentos; las modificaciones anatómicas y fisiológicas que desarrolla y los cambios que produce en la rizosfera para adaptarse a su condición, requiere de un enfoque fisiológico.

Chaney (1988) indica que desde un enfoque nutricional las plantas se pueden clasificar como eficientes, normales e ineficientes para la toma y utilización de los nutrimentos, pudiéndose encontrar diferencias interespecíficas e intervarietales en una misma condición o en condiciones diversas. En la mayoría de los casos se ha encontrado que el control sobre la eficiencia o no de los materiales lo ejerce un par de genes simples; por otro lado, se han localizado mutantes recesivos y deletéreos. Y, menciona que la serie de pasos requeridos para ganar la aceptación de cultivos resistentes a clorosis, como una solución a problemas de clorosis en cualquier cultivo: Primero, comprobar que la clorosis causa una pérdida económica al productor y establecer la relación entre la severidad de la clorosis y la pérdida en el rendimiento. Después evaluar la susceptibilidad a clorosis del cultivo utilizado normalmente, y publicar estos

descubrimientos con la finalidad de que los productores seleccionen los cultivos más resistentes a los problemas de campo. Finalmente los fitomejoradores cuentan con bases económicas para seleccionar cultivares resistentes a clorosis férrica, para las cuales se deberá experimentar las mejores técnicas de selección. Cuando los cultivares mejorados sean seleccionados, los fisiólogos tendrán herramientas para investigar la fisiología y bioquímica de la resistencia a clorosis.

Plackson (1980) indica que las plantas eficientes desarrollaron características especiales para condiciones donde los nutrientes son escasos:

1. Ajuste de la tasa de crecimiento de acuerdo con el suplemento de nutrientes.
2. Eficiente adquisición de nutrientes.
3. Eficiente economía interna por medio de una eficiente redistribución de los nutrientes dentro de la planta y menores requerimientos en los sitios funcionales.

Eso se logra por medio de plantas con variabilidad genética en la habilidad para utilizar nutrientes eficientemente y crecer en moderados o severos niveles de estrés de nutrientes.

Brown y Jones (1976) han encontrado evidencias de que el uso del Fe por las plantas es controlado genéticamente por un mecanismo adaptativo el cual es activado en las plantas Fe-eficientes en respuesta a una deficiencia de Fe, pero permanece inactivo si el Fe es suficiente. Prohaska y Fehr (1981) indican que la resistencia genética a clorosis férrica se puede considerar de carácter cuantitativo debido al gran efecto de los genes modificadores y el ambiente sobre la expresión del carácter.

Cortinas (1985) identificó cinco genotipos (Mulato, Pinto Norteño, FE-30-RB, S-17-RB y FE-22-RB) altamente resistentes a la deficiencia de hierro asimilable en el suelo y mostraron estabilidad a través de los años indicando que su respuesta a la deficiencia no fue afectada por el ambiente, mientras que Delicias-71, Agrarista, Ciateño, Agramejo, FE-33-RB, Adjuntas-22, LEF-25-RB y S-4-RB, se clasificaron como resistentes. INCA

(1981, 1982) también reporta a las mismas variedades como sobresalientes simultáneamente para rendimiento y altamente resistentes a clorosis. Flor de mayo y Pinto 114 como moderadamente susceptibles. Y, menciona que por efecto de la clorosis el rendimiento por hectárea se redujo grandemente, además disminuyó un 55 por ciento el número de vainas por planta, 20 por ciento el número de semillas por vaina, nueve por ciento el peso de 100 semillas y 37 por ciento la altura de planta con relación a una localidad sin problemas de deficiencia. El mismo autor señala que una forma de estimar el valor de un genotipo con respecto a su respuesta a clorosis y otras características agronómicas consiste en estudiar la diferencia en rendimiento y sus componentes en una localidad que se encuentre libre de clorosis.

Chaney (1988) señala que la selección genética parece ser la mejor solución para clorosis férrica en suelos calcáreos. Importantes progresos se han realizado en la selección de soya resistente a clorosis férrica: 1) el mejoramiento de resistencia a clorosis no requiere alguna reducción en el potencial de producción del cultivo. 2) los productores pueden realizar selección directa de plantas resistentes a clorosis con alto rendimiento y 3) se puede mejorar la resistencia a clorosis por líneas con selección recurrente, utilizando soluciones nutritivas para seleccionar las progenies más resistentes. Además el mejoramiento genético es un método eficiente y económico de fácil adopción para el agricultor. El mismo autor comenta que a los fitomejoradores les toma largo tiempo mejorar la resistencia a clorosis de algún cultivo, pero especialmente es más tardado para los árboles.

## **2.6. Transformaciones Microbianas del Hierro**

El hierro se puede precipitar en la naturaleza gracias a la actividad de las bacterias que lo oxidan, de los heterótrofos que descomponen la parte orgánica de las sales del metal, debido a la liberación de O<sub>2</sub> realizada por las algas, y a la creación de una reacción alcalina. Inversamente, la solubilización puede ocurrir mediante la



formación de ácido, por la síntesis de algunos productos orgánicos o por la producción de condiciones reductoras.

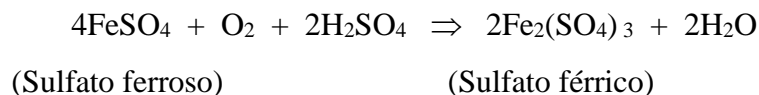
Alexander (1980) indica que los microorganismos están involucrados en las transformaciones del hierro en un cierto número de formas característicamente diferentes y la configuración del elemento puede ser afectada mediante varios mecanismos biológicos: a) algunas bacterias son capaces de oxidar el hierro ferroso al estado férrico, el cual se precipita como hidróxido férrico; b) muchas especies heterótrofas atacan sales orgánicas de hierro solubles, de manera que el hierro, ahora en forma inorgánica y sólo ligeramente soluble, se precipita de la solución; c) los microorganismos alteran el potencial de óxido-reducción de sus alrededores; la disminución del potencial de óxido-reducción que resulta del crecimiento microbiano conduce a la formación del ion ferroso, más soluble, a partir del ion férrico, que es altamente insoluble; d) innumerables bacterias y hongos producen ácidos como el carbónico, nítrico, sulfúrico y ácidos orgánicos, el incremento en la acidez introduce al hierro en solución; e) en condiciones de anaerobiosis, el sulfuro formado a partir del sulfato y los compuestos orgánicos de azufre pueden extraer al hierro de la solución en forma de sulfuro ferroso; f) el hecho de que los microorganismos liberen algunos ácidos orgánicos y otros productos carbonados durante su metabolismo da por resultado, con frecuencia, la formación de complejos orgánicos de hierro solubles; este proceso es el inverso del inciso b, anteriormente señalado.

Aún en medios de cultivo que contengan sales ferrosas solubles, la formación de productos alcalinos provoca una oxidación y, por lo tanto, una precipitación del metal como ión férrico. Por otra parte, si el potencial de óxido-reducción es inferior a 0.2 volts, gran parte del hierro se encontrará en estado ferroso; a potenciales mayores a 0.3 volts, la forma principal será el ión férrico. Por lo tanto, un incremento en la intensidad de reducción permite la acumulación de hierro ferroso soluble, mientras que cuando el medio ambiente se oxida más ocurre lo contrario. Los efectos del O<sub>2</sub>, del potencial de óxido-reducción y del pH sobre el crecimiento y sobre el equilibrio ferroso-férrico, con

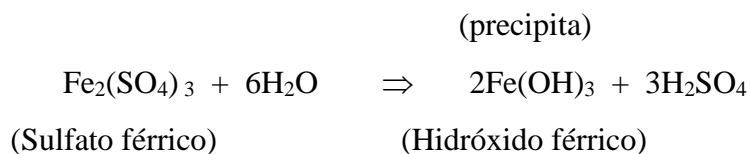
frecuencia dificultan la determinación de sí el proceso de precipitación del hierro es enzimático o puramente químico.

El principal organismo responsable de la liberación biológica del hierro del mineral de sulfuro es *Thiobacillus ferrooxidans*, (es quimioautótrofo activo sólo en suelos ácidos en un pH de 2 a 4.5). A valores de pH cercanos a la neutralidad, el hierro ferroso es oxidado fácilmente de manera no biológica y puede precipitarse en células microbianas.

La reacción que produce energía para mantener la proliferación de *T. ferrooxidans* se expresa en diferentes formas. En vista de que el sulfato férrico puede ser el producto principal, el proceso productor de energía se escribe a veces para dar tal molécula: (oxidación enzimática).



El organismo es a menudo cubierto con hidróxido férrico y éste probablemente surge por medio de una reacción no biológica (reacción química):.



La producción de energía durante la oxidación del hierro es pequeña, cerca de 10 kcal por átomo gramo de hierro (55.8 g).

Estos *tiobacilos* favorecen marcadamente al proceso, ayuda que se puede deber al aumento de la tasa de su conversión total o al incremento en la velocidad de una etapa en una secuencia de reacciones que tenga varios pasos. Una secuencia de reacciones que

pueda dar idea de los cambios vistos en la naturaleza puede incluir una oxidación inicial de la pirita u otro sulfuro metálico, proceso que puede ser microbiano o no biológico:



Muchas especies heterótrofas pueden degradar los complejos y liberar el hierro ligado. La porción orgánica de la molécula provee energía para la proliferación microbiana y mientras la mitad carbonada es descompuesta, el hierro se libera y precipita en forma de sales férricas insolubles.

Además de su liberación del citrato de amonio férrico, el hierro se precipita de soluciones de sales de citrato, lactato, acetato, malato, malonato, oxalato y galato. Los representantes de los géneros bacterianos de *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Serratia*, *Acinetobacter*, *Klebsiella*, *Mycobacterium* y *Corynebacterium*, varios tipos de hongos filamentosos y especies de *Nocardia* y *Streptomyces* son activos en la conversión.

Las plantas que crecen en soluciones nutritivas estériles que contienen complejos férricos disponen de poco Fe, pues el hierro es puesto a disposición lentamente, ya que la degradación microbiana de estos compuestos no se lleva a cabo. Los compuestos de hierro orgánico característicos del humus, pueden ser atacados por un nuevo grupo de bacterias; estos organismos son miembros de los géneros *Pedomicrobium*, *Metallogenium* y *Seliberia* y su acción da como resultado el depósito de los hidróxidos férricos que cubren a la bacteria.

Muchas bacterias, cuando crecen en medios orgánicos con niveles de O<sub>2</sub> por debajo del óptimo, solubilizan una parte del Fe(OH)<sub>3</sub> u óxido férrico agregados. Las transformaciones que resultan en la producción ferrosa no son peculiares a ningún género individual sino que son atribuidos de una gran variedad de organismos y tantas como de 10<sup>4</sup> a 10<sup>5</sup> o a veces 10<sup>6</sup> bacterias por gramo de suelo tienen la capacidad de reducir el hierro activamente.

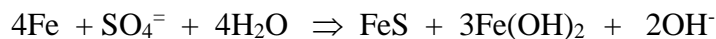
Entre los géneros que contienen especies capaces de convertir hierro férrico a ferroso están *Bacillus*, *Clostridium*, *Klebsiella*, *Pseudomonas* y *Serratia*. La conversión de hierro tri o divalente, al menos en ciertos heterótrofos, parece ser enzimática y probablemente el ión férrico sirva en la respiración como un aceptor de electrones. El catión trivalente puede así sustituir al O<sub>2</sub> en el metabolismo celular cuando no existe O<sub>2</sub> disponible.

En cultivos, el nitrato suprime la capacidad de reducción de hierro de muchos de los cultivos activos. Además, muchas, pero no todas las especies que reducen iones férricos pueden convertir el nitrato a nitrito. Sobre la base de estos descubrimientos, se ha postulado que la reducción enzimática del hierro se lleva a cabo por uno de estos dos mecanismos: a) En algunos heterótrofos, la reacción es catalizada por la misma enzima relacionada con la producción de nitrito a partir del nitrato (nitrato reductasa) ó b) La transformación puede incluir una enzima que no intervenga en el metabolismo del nitrato.

En ausencia de O<sub>2</sub>, puede tomar lugar otro proceso biológico de importancia en las transformaciones de hierro. Este es la producción de sulfuro, ya sea por mineralización del azufre orgánico o por la reducción del sulfato. Los microorganismos que forman H<sub>2</sub>S de esta manera causan la precipitación de hierro, en forma de sulfuro ferroso, por una reacción del H<sub>2</sub>S con las sales de hierro.

La población relacionada se puede deducir de la función estimulante del sulfato y no existe duda de que el sulfuro, formado por las poblaciones de *Desulfovibrio*, reductoras de sulfato, es el que produce un cambio en el hierro a través de la precipitación del sulfuro ferroso. Como las bacterias son anaerobios estrictos que utilizan el sulfato como aceptor de electrones para el crecimiento, la necesidad de sulfato, un  $E_h$  bajo y la anerobiosis pueden comprenderse. El intervalo de pH para estas

bacterias se asemeja al de la corrosión del hierro, por ejemplo pH de 5.5 o más. La reducción neta se representa mejor por la ecuación:



con el sulfuro ferroso y el hidróxido ferroso como productos.

## 2.7 Antagonismo y Sinergismo del Hierro con Respecto a Otros Nutrientes

Soltanpour *et al.* (1995) indica que la relación óptima entre dos nutrientes deberá producir una producción máxima cuando ambos nutrientes se encuentren en sus respectivos rangos de suficiencia.

Chaney (1988) indica que en la clorosis férrica en leguminosas es importante la fijación de N en el balance de la planta entre aniones y cationes, el cual afecta el pH de la rizósfera.

Loué (1988) señala las principales interacciones entre los elementos nutritivos susceptibles de afectar la asimilabilidad (o la absorción y utilización) del microelemento en el sentido positivo (aumento) o negativo (disminución). (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de macro y micronutrientes en su antagonismo y sinergismo para la planta con respecto al hierro.

| ELEMENTO  | EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES | EFFECTOS DE OTROS MICROELEMENTOS                       |
|-----------|---------------------------------------|--|
| Hierro    | P negativo, K variable.               | Mn, Cu, Zn, Mo un poco negativos en orden decreciente. |
| Manganeso |                                       | Fe muy negativo.                                       |
| Zinc      | P muy negativo, variable.             | N Interrelación con Fe en la planta.                   |

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| Cobre     | N y P negativos                                 | Zn un poco negativo.  |
| Boro      | N negativo, P positivo, K variable, Ca negativo | Poco importantes. Mn ligeramente positivo<br>La deficiencia de Cu tiene un efecto negativo. |
| Molibdeno | P positivo, S negativo                          | Fe totalmente negativo, Mn y Cu negativos.  |

Yañez (1987) menciona que el Fe presenta antagonismo con casi todos los cationes ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y  $\text{K}^{+}$ ) y elementos ferrometálicos ( $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$ ); por lo tanto, con la adición al suelo de estos se induce a una clorosis férrica. La adición al suelo de fósforo induce la deficiencia férrica, se desconoce el proceso, pero probablemente es debido a que la raíz excreta  $\text{OH}^{-}$  para aprovechar el fósforo alcalinizando el suelo y reduciendo la absorción del hierro. Loué (1988) menciona que una fertilización fosfatada muy elevada o un medio rico en ácido fosfórico asimilable puede producir reducciones de la asimilación de Fe, Cu y sobre todo de Zn y aumenta en relación con B y Mo. Por lo contrario Vergara (1992) encontró que el exceso de hierro ferroso provoca deficiencias de fósforo y potasio.

Chaney (1988) menciona que parte de la toxicidad de los metales se puede deber a la represión de los metales unidos a proteínas las cuales normalmente son sensibles a la actividad del  $\text{Fe}^{+2}$ . Los metales podrían por lo tanto causar represión de respuestas adaptativas e inducir clorosis férrica. Bastantes reportes de clorosis férrica inducidas por Zn, Co, Ni, Cu, Cd y Mn han sido reportados.

## 2.8 Control de la Clorosis Férrica

Chaney (1988) señala que la alternativa para el mejoramiento de la resistencia a clorosis férrica de cultivos adaptados, es la aplicación de fertilizantes con hierro. La aplicación foliar de sales de  $\text{Fe}^{+2}$  es común en sorgo, cacahuate y muchos cultivos frutícolas. Pocos agricultores aplican fertilizantes con Fe al suelo, excepto en cultivos con alto valor tales como los cítricos, duraznos y aguacate.

### 2.8.1 Uso de mejoradores de suelo para el control de clorosis férrica

Narro (1987) señala que para evitar condiciones de deficiencia en las plantas, el mejoramiento o adecuación del suelo se debe hacer tomando como indicadores la respuesta fisiológica de la planta a valores de propiedades del suelo, que por su magnitud, son indicadores del problema a combatir. Narro y Méndez (1982) definen a los mejoradores del suelo como productos de diferente origen y composición, que al ser aplicados al suelo producen cambios en este, los cuales repercuten en una mayor eficiencia en el desempeño en las funciones que tiene el suelo en beneficio de las plantas.

Yáñez (1987) indica que cuando se tiene el problema de mala absorción de hierro por las raíces, se puede airear el suelo para mejorar la absorción de ese elemento al eliminar el  $\text{CO}_2$  del suelo y evitar que reaccione con  $\text{CaCO}_3$  y produzcan  $\text{HCO}_3$  que inhibe la traslocación del hierro dentro de la planta.

Alexander (1980) menciona que el tratamiento con materia orgánica aumenta la reducción, y la cantidad de hierro ferroso que aparece en la solución del suelo está directamente relacionada con la cantidad de sustrato fermentable agregado.

Varios mecanismos pueden explicar la reducción férrica microbiológica y el efecto estimulante de sustratos fermentables. Un incremento en la acidez que acompaña a la fermentación favorece la movilización del hierro. La disminución de  $\text{O}_2$ , como consecuencia del metabolismo microbiano, tenderá a bajar el  $E_h$  y provocar la reducción férrica. La reacción directa de productos de fermentación con óxidos e hidróxidos férricos, la reducción puede ser el resultado de transporte de electrones, funcionando el hierro como aceptor de electrones en la respiración celular de una manera análoga a la reducción de nitrato por bacterias desnitrificantes.

El uso de sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) obtenido a partir del mineral leonardita del período carbonífero, estimula los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas cultivadas a concentraciones muy bajas, además ayuda a la mejor asimilación de los nutrientes presentes en el suelo o aplicados como fertilizante (Omega Agroindustrial, S.A. 1989).

### **2.8.2 Uso de quelatos de hierro para el control de clorosis férrica**

El hierro se absorbe por las plantas en forma ferrosa ( $\text{Fe}^{+2}$ ) y férrica ( $\text{Fe}^{+3}$ ) pero principalmente en forma ferrosa, además de otras formas orgánicas complejas como los quelatos. Al respecto Yañez (1987) menciona que las sustancias quelatantes excretadas por la raíz por medio de ligaduras coordinadas (comparten un par de electrones) entre el oxígeno y el nitrógeno con el hierro, lo ligan para ser absorbido. El Ca y el Mg compiten con los elementos metálicos por las sustancias quelatantes y no se aprovecha el hierro en su caso.

Grusak (1994) estudiando el proceso que controla el transporte de Fe, para desarrollar las semillas, en plantas cv Sparkle en hidroponía, encontró que el contenido promedio de Fe de semillas maduras fue de 19  $\mu\text{g}$  y concluye que el Fe del floema es guiado en forma quelatada y la síntesis de quelatos endógenos es un factor importante en el control del transporte de Fe a las semillas.

Los quelatos pueden provenir de excreciones radicales, de la materia orgánica (ácidos húmicos y fúlvicos), o de microorganismos.

Los posibles mecanismos para los efectos positivos de exudados de la raíz sobre la absorción de Fe son (Bienfait *et al*, 1983):



1. Quelatación de iones férricos de sales férricas insolubles.
2. Sirviendo como fuente de carbón para el crecimiento de microorganismos, los cuáles demandan oxígeno del suelo, resultando en forma localizada niveles bajos de oxígeno. El  $\text{Fe}^{+3}$  es reducido a  $\text{Fe}^{+2}$  por los compuestos producidos por los microorganismos.
3. Reducción directa de quelatos férricos para producir iones ferrosos.

Los quelatos de síntesis industrial, pueden también ser aportados como fuentes de Fe (Loué, 1988).

El EDTA forma quelato de  $\text{Fe}^{3+}$  por debajo de pH 6.3 la competencia de  $\text{Ca}^{2+}$  crece muy rápidamente por encima del pH 6 y el quelato de Ca domina por encima del pH 6.8.

El quelato DTPA domina hasta alrededor de pH 7,5. El  $\text{Ca}^{2+}$  desplaza al  $\text{Fe}^{3+}$  por encima del pH 7 y el Ca DTPA domina por encima del pH 7,5.

EL quelato EDDHA es particularmente selectivo para  $\text{Fe}^{3+}$  y los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  no compiten con  $\text{Fe}^{3+}$ .

EL quelato HEDTA forma un complejo con el Fe de estabilidad inferior y menos específico para  $\text{Fe}^{3+}$ . Los quelatos Al son aquí muy importantes y dominantes de pH 4 a 4,8. EL HEDTA Fe domina de pH 4.8 a 6.7 y el HEDTA Ca de 6.7 a 9. Por encima del pH 7.5 la estabilidad HEDTA Fe es pequeña.

Los quelatos de hierro más utilizados comercialmente son: Sequestrene 138, quelato de hierro EDDHA (ácido etilen diamino dihidroxiacético) y Sequestrene 330, quelato de hierro DTPA (ácido dietilen triamino fenoxiacético) o EDTA (ácido etilen diamino tetracético) de CIBA-GEIGY. El sequestrene 330 (DTPA y EDTA) en suelos de

un pH de 7.5 se pierde su poder quelatante, por lo que no es efectivo, por lo tanto se recomienda para aplicación foliar. El sequestrene 138 (EDDHA) es efectivo en el suelo en todo el rango de pH.

En la aspersión se recomienda utilizar un detergente para incrementar la acción surfactante, dispersante y penetrante como son el Tritón, Bión y el X-7.

## 2.9 Requerimientos Nutrimientales del Frijol

Yáñez (1987) señala que aún en un mismo suelo las plantas extraen diferentes concentraciones de iones, es decir, los iones se regulan de acuerdo a las necesidades de las plantas. La cantidad de un elemento en la planta depende de los siguientes factores: Necesidades de la planta, capacidad de extraerlo del suelo y de la capacidad del suelo para proporcionarlo.

La cantidad de nutrimentos en lb acre<sup>-1</sup> removidos del suelo por el cultivo del frijol según Hester and Shelton (1949) es:

| CULTIVO    | N<br>lb acre <sup>-1</sup> | P<br>lb acre <sup>-1</sup> | K<br>lb acre <sup>-1</sup> | Ca<br>lb acre <sup>-1</sup> | Mg<br>lb acre <sup>-1</sup> | S<br>lb acre <sup>-1</sup> | B<br>lb acre <sup>-1</sup> |
|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Lima beans | 95                         | 10                         | 94                         | 61                          | 7.6                         | ---                        | 0.67                       |
| Snap beans | 200                        | 3                          | 46                         | 62                          | 2.9                         | 3.9                        | ---                        |

Walsh y Beaton (1973) indican que las concentraciones consideradas como adecuadas, detectadas en las hojas de frijol a inicios de floración y analizadas sobre la base de materia seca, son las siguientes:

| PORCENTAJE |      |     |     |      | PPM |    |    |     |    |
|------------|------|-----|-----|------|-----|----|----|-----|----|
| N          | P    | K   | Ca  | Mg   | Fe  | Cu | Zn | Mn  | B  |
| 3.0        | 0.25 | 1.8 | 0.8 | 0.25 | 300 | 15 | 30 | 30  | 40 |
| 6.0        | 0.50 | 2.5 | 3.0 | 0.70 | 450 | 30 | 60 | 300 | 60 |

Los rangos de concentración de nutrimentos en folíolos de frijol al inicio de la floración se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Rangos de concentración de nutrimentos propuestos por Jones *et al* (1991) en folíolos de frijol al inicio de la floración.

| Elemento | Bajo      | Suficiente | Alto   |
|----------|-----------|------------|--------|
| P (%)    | 0.25-0.34 | 0.35-0.75  | > 0.75 |
| K (%)    | 2.00-2.24 | 2.25-4.00  | > 4.0  |
| Ca (%)   | 1.00-1.49 | 1.50-2.50  | > 2.5  |
| Mg (%)   | 0.25-0.29 | 0.30-1.00  | > 1.0  |
| Fe (ppm) | 40-49     | 50-300     | > 300  |
| Zn (ppm) | 18-19     | 20-200     | > 200  |

## 2.10. Análisis de Tejido Vegetal

El análisis foliar no descarta el análisis de suelo; el análisis de tejido nos sirve cuando los elementos están en baja concentración, según el análisis de suelo (Yáñez, 1987). Al conocer la cantidad de elementos en el suelo podemos determinar el antagonismo entre ellos por medio de un análisis foliar. La etapa fenológica es importante en el análisis de tejido.

Para recomendar fertilización, la muestra del tejido debe ser representativa, hojas sanas sin mezclar hojas sanas con hojas con síntomas y no muestrear tejidos dañados por plagas o insectos.

Chapman (1964) sugiere que la parte a muestrear en el frijol son las hojas maduras (sin peciolo), cuando el 10 por ciento de las plantas están en floración y se debe de muestrear el cinco por ciento del total de plantas.

Cuadro 4. Concentración de nutrimentos mínima, máxima y óptima de las soluciones de Swartz y Douglas en ppm. Tomado de Sánchez y escalante, 1983.

| ELEMENTO  | CONCENTRACIÓN |         |          |         |        |         |
|-----------|---------------|---------|----------|---------|--------|---------|
|           | MÍNIMA        |         | OPTIMA   |         | MÁXIMA |         |
|           | Swartz        | Douglas | Swartz   | Douglas | Swartz | Douglas |
| Nitrógeno | 200           | 150     | 300-900  | 300     | 1000   | 1000    |
| Fósforo   | 30            | 50      | 30-90    | 80      | 100    | 100     |
| Potasio   | 150           | 100     | 200-400  | 250     | 600    | 400     |
| Calcio    | 100           | 300     | 150-400  | 400     | 600    | 500     |
| Magnesio  | 25            | 50      | 25-75    | 75      | 150    | 100     |
| Azufre    | 150           | 200     | 200-1000 | 400     | 1000   | 1000    |
| Cloro     | 30            | -       | 350      | -       | 600    | -       |
| Fierro    | -             | 2.0     | 0.5-2    | 5       | 2      | 10      |
| Boro      | -             | 0.5     | 0.2-1    | 1       | 1      | 5       |
| Zinc      | -             | 0.5     | 0.2-2    | 0.5     | 2      | 1       |
| Cobre     | -             | 0.1     | 0.1-2    | 0.5     | 2      | 0.5     |
| Manganeso | -             | 0.5     | 1-5      | 2       | 5      | 5       |
| Molibdeno | -             | 0.001   | -        | 0.001   | -      | 0.002   |

\* Los sólidos totales no deben pasar las 3,000 ppm y los niveles de Cl no deben pasar de 600 ppm.

## 2.11 Análisis de Crecimiento

Maeda (1986) menciona que el crecimiento se define como un incremento irreversible en el peso seco de la planta y considera a través del cálculo de varios índices el crecimiento de las plantas y su relación con el aparato fotosintético.

La cantidad real de tejidos en funcionamiento, presente en una planta, se llama biomasa y es por lo general medida por el peso seco, materia orgánica o contenido de energía del material vegetal. Si la biomasa se cosecha en un intervalo de tiempo conocido, el índice de crecimiento (IC) se puede estimar por el incremento en biomasa. En un ecosistema, este índice se define como la producción en un período, este valor también se ha llamado productividad primaria.

Escalante y Kohashi (1993) establecen que todo el material formado en una comunidad de plantas por unidad de área de suelo y por unidad de tiempo, se llama índice de crecimiento del cultivo (ICC).

Los cálculos de otras características en el análisis de crecimiento, requiere del conocimiento del tamaño del aparato asimilatorio, el cual se mide en términos de área foliar, también se define como área de la superficie asimilatoria por la planta o muestra de varias plantas o por unidad de área de suelo. El área foliar por unidad de área de suelo es llamada IAF. Otra característica importante que describe el tamaño relativo del aparato asimilativo es la relación área foliar (RAF), lo cual es la relación entre el área foliar y el peso seco total.

## **2.12 Diagnóstico Nutricional**

La evaluación del estado nutricional de la planta se puede realizar por experiencia de técnicos y productores, la sintomatología visual, el análisis de suelos, los experimentos de campo e invernadero, el análisis foliar, y análisis bioquímicos y fisiológicos.

### 2.12.1 Sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS)

El DRIS (por sus siglas en inglés: Diagnosis and Recommendation Integrated System) generalmente se utiliza para dar recomendaciones del estado nutricional de los cultivos.

Soltanpour *et al.* (1995) describen el DRIS como un método potencial para interpretar la composición nutrimental de las hojas de las plantas. Walworth y Sumner (1987) mencionan que Beaufils desarrolló el DRIS en 1950. Utiliza una comparación en la concentración de los tejidos de las hojas de relaciones de pares de nutrimentos con normas desarrolladas de poblaciones de alto rendimiento, para diagnosticar deficiencias de nutrimentos.

Walworth y Sumner (1987) indican que la desviación relativa de las relaciones de los nutrimentos en la hoja de las normas, siempre utilizan las relaciones más pequeñas como denominador, es dividido por el porcentaje del Coeficiente de Variación (CV) para esa relación en la población de altos rendimientos y multiplicada por mil, para obtener la función DRIS para las relaciones de pares de nutrimentos. El promedio de todas las funciones de un nutrimento en el numerador de todas las relaciones de los pares forman el índice DRIS. Los mismos autores señalan que valores positivos, cero y negativos de los índices DRIS se utilizan para representar un relativo exceso, un relativo balance adecuado, y una relativa deficiencia de nutrimentos, respectivamente y concluyen que el sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS) es superior a los rangos de suficiencia de nutrimentos (NSR), para diagnosticar los análisis de las plantas, porque el DRIS esta menos sujeto a cambios en la concentración de nutrimentos causados por el desarrollo de la planta.

Soltanpour *et al.* (1995) mencionan que en un estudio compararon el DRIS con el NSR para el diagnóstico de necesidades de nutrimentos en maíz en Colorado, E.U.A. Utilizando las normas estándar de DRIS y las normas DRIS de Colorado, calculadas de

la composición de las hojas de la mazorca de cultivos de maíz con una producción de 11 Mg de grano por hectárea o más. Los valores de NSR se basaron en concentraciones de nutrimentos mínimas y máximas, valores encontrados en la literatura. Concluyeron que el NSR interpretó mucho mejor que el DRIS sin incluir la materia seca, la identificación de deficiencia de nutrimentos para el maíz en Colorado y recomendaron el NSR en combinación con el análisis de suelo para evitar un mal diagnóstico de deficiencia de Zn y Cu cuando el Nitrógeno es extremadamente deficiente y mencionan las siguientes fallas del DRIS:

1) Niveles altos de un nutrimento pueden causar una falsa relativa deficiencia (desbalance) en el diagnóstico de otros nutrimentos.

2) Con una relación óptima entre dos nutrimentos, produce producciones máximas solamente cuando ambos nutrimentos se encuentran en sus respectivos rangos de suficiencia.

Elwali and Gascho (1988) indican que el DRIS en combinación con niveles críticos de nutrimentos en las hojas (CNL), es necesario para una exacta interpretación de los datos de la composición nutrimental de las hojas. El CNL se refiere al límite inferior de el NSR para un nutrimento dado.

Soltanpour *et al.* (1995), mencionan que el DRIS asume que debe de existir un balance entre todos los nutrimentos y ellos recomiendan que es mejor determinar experimentalmente el efecto de las interacciones de los nutrimentos en la producción.

### **2.12.2 Desviación del porcentaje óptimo (DOP)**

Para la interpretación de análisis foliares, Montañés *et al.* (1993) propusieron un nuevo índice como una metodología alternativa para la interpretación del análisis

mineral de las plantas, este nuevo índice se le conoce como Desviación del Porcentaje Óptimo (DOP, por sus siglas en inglés).

Montañés *et al.* (1993) comparó el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS) y la Desviación del Porcentaje Óptimo (DOP) en cultivos como maíz, soya, sorgo, alfalfa, y encontró el mismo orden de requerimiento con ambos sistemas y concluye que el DOP se puede aplicar a cualquier cultivo, presenta índices de déficit o exceso y nivel óptimo y permite conocer el orden en que un elemento limita el rendimiento.

Los índices de DOP se definen como la desviación del porcentaje de la concentración de un elemento (por ciento basado en materia seca) con respecto a la concentración óptima tomada de los valores de referencia. Para calcular los índices se aplica la siguiente fórmula general:

$$DOP = [ ( C * 100 ) / Cref ] - 100$$

Donde:

DPO.- Desviación del Porcentaje Óptimo.

C.- Concentración del elemento, resultado del análisis foliar.

Cref.- Concentración óptima del nutrimento, propuesto para el cultivo en referencia.

El valor absoluto del índice DOP indica la importancia de la severidad de una situación anómala (desbalance nutricional). Cuando el elemento se encuentra en una concentración óptima, el DOP para ese elemento es igual a cero. Cuando el DOP es negativo indica déficit del elemento y positivo indica exceso.

## **2.13 Hidroponia**

### **2.13.1 Medios de cultivo**



Yáñez (1987) menciona que la hidroponia se basa en cultivar en una solución acuosa con nutrimentos y un medio de sostén para las plantas. En condiciones de campo la planta en su expresión genética esta determinada por el medio ambiente. Si se controlan las condiciones se puede expresar el máximo potencial. Las condiciones principales a controlar son: el suelo, la temperatura, la humedad relativa, los factores bióticos y la solución nutritiva.

Sánchez y Escalante (1983) señalan que las ventajas de la hidroponia son:

1. Se puede balancear el agua, el aire y los nutrimentos.
2. Se puede proveer un drenaje excelente.
3. Se pueden corregir en pocos días problemas nutricionales que aparezcan.
4. Se puede controlar el pH.
5. Se incrementa la calidad y el rendimiento.
6. Existe una mayor precocidad en producción.
7. Se pueden obtener varias cosechas al año.
8. Se puede emplear el monocultivo.
9. Se tiene una mayor eficiencia en el uso del agua.

Desventajas de la Hidroponia:

1. Se requiere conocimientos técnicos de agronomía, química, fisiología vegetal y nutrición vegetal.
2. El costo inicial es muy alto.
3. Es un sistema para cultivos intensivos.
4. Se deben cuidar los detalles como bombeo, aireación, conducción, concentraciones en la solución, pH, luminosidad.
5. Se requiere de una estructura para almacenar el agua y reciclarla hasta en una semana.
6. Se debe controlar la incidencia de algas por medio de la intensidad de la luz y la velocidad del reciclaje del agua.

Como medio de cultivo se puede utilizar lo siguiente: Solución nutritiva, agregados y grava. La solución nutritiva esta formada por el agua con los elementos nutritivos en solución y requiere de un sistema de oxigenación. Los agregados pueden ser de arena, perlita, vermiculita, aserrín, turba de musgo (peat moss). Estos materiales no necesitan sistema de oxigenación. La grava comprende, además de los tipos de grava comunes, a otros sustratos semejantes (de más de dos mm de diámetro), como son: ladrillo quebrado, carbón, tezontle y otros tipos de lava volcánica.

El sistema de riego en hidroponia puede ser por inundación, subirrigación, aspersión, goteo, capilaridad, atomización a las raíces. Welles (1995) señala que en los Países Bajos se están introduciendo los llamados sistemas cerrados de sustratos, en combinación con la recirculación de la solución nutrimental. Estos sistemas mejoran significativamente la eficiencia del agua y fertilizantes, y evitan la contaminación del agua del suelo con sustancias químicas o pesticidas. Este autor menciona que se han desarrollado las soluciones de nutrimentos para distintos cultivos y los valores guía para los datos analíticos de extractos de sustratos. Los diferentes valores guía para la solución de suelos entre cultivos se explican por la más alta captación de nutrimentos de cierto cultivo, pero sobre todo por una presión osmótica más alta, necesaria para la calidad del producto.

### **2.13.2 Soluciones y formulaciones**

Yáñez (1987) menciona que las soluciones nutritivas deben contener un buen balance nutricional, basado en las necesidades de la planta y no en el nivel de absorción. Sánchez y Escalante (1983) señalan que el pH debe fluctuar entre 5 y 6.5, si se alcaliniza el medio se neutraliza con el ácido sulfúrico, haciendo la reacción antes de poner la solución en contacto con la planta. Si el medio se acidifica se utiliza el hidróxido de potasio para tender a la neutralidad; para cambios ligeros del pH se utiliza el hidróxido

de amonio. Se debe cuidar el rango óptimo de  $K^+$ , la concentración de solutos en solución se debe mantener a un potencial osmótico entre 0.5 a 2 atm.

Se debe evitar combinar fuentes que induzcan reacciones que impidan la disponibilidad de los nutrimentos, por ejemplo Ca con S. Para el caso de elementos metálicos, se recomienda utilizar quelatos para incrementar la disponibilidad o sulfatos y cloruros.

En el agua corriente los elementos menores no se agregan, ya que es suficiente la concentración que tiene, solo se agrega N, P, K, Fe y se cuida el nivel de Ca y Mg; los niveles de N, P y K se determinan de acuerdo al estado fisiológico de la planta.

Los materiales se deben agregar a la solución de la siguiente manera: primero agregar los materiales menos solubles, de fácil precipitación, se agita y se agregan los macronutrimentos, después se agrega la solución de hierro y se agita y por último se agregan los micronutrimentos. Se recomienda aforar para evitar un incremento en el potencial osmótico y cambiar la solución semanal o quincenalmente. A partir de cultivos sobre arenas, fertilizados con microelementos, Cottenie *et al.* (1970) indican que la absorción de Fe y Cu son las menos variables y las de B y Mo fueron las más correlacionadas con los contenidos del medio. Por último las de Mn y Zn eran las más dependientes de otros factores del medio.

Welles (1995) indica que la fertilización se emplea en la industria de los invernaderos para controlar el crecimiento y la calidad de los cultivos mediante ajustes de la presión osmótica de la solución de suelos. El mismo autor señala que en base en datos experimentales, se han desarrollado las soluciones de nutrimentos para distintos cultivos y los valores guía para los datos analíticos de extractos de substratos. Los diferentes valores guía para la solución de suelos entre cultivos se explican por la más alta captación de nutrimentos de cierto cultivo, pero sobre todo por una presión osmótica más alta, necesaria para la calidad del producto.

Las fórmulas de investigación más comunes son: Hoagland's, Steiner, Johnson y Swartz; no existe una fórmula ideal para un cultivo y una variedad; un cultivo puede tener buena respuesta con varias fórmulas. Sánchez y Escalante (1983) indican los niveles de elementos de las soluciones de Swartz y Douglas (Cuadro 4).

Welles (1995) menciona que los ajustes en las proporciones de los nutrientes se realizan con base en los datos analíticos de laboratorio de las muestras (tomadas quincenalmente) de la solución de suelo del sustrato.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción de la Zona de Estudio

##### 3.1.1 Localización

La presente investigación se desarrolló en el Campo Agrícola Experimental de la Facultad de Agronomía de la U.A.N.L., localizado en el km 17 de la carretera Zuazua-Marín en el municipio de Marín Nuevo León, México. Su ubicación geográfica corresponde a las coordenadas 25° 53' Latitud Norte y 100° 03' Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich, con una altitud de 375 msnm. Sus límites políticos son al norte, Higuera; al sur Pesquería; al este Doctor González y al oeste General Zuazua, municipios del estado de Nuevo León.

##### 3.1.2 Clima

El clima de la región, de acuerdo a la clasificación de Köppen, modificado para México por García (1973), es del tipo BS<sub>1</sub> (h<sup>^</sup>)hx<sup>^</sup>(e<sup>^</sup>), lo cual indica:

BS<sub>1</sub>: Clima seco o árido, con régimen de lluvias en verano, siendo el más seco de la clasificación BS.

(h<sup>^</sup>)h: Temperatura anual sobre 22°C (cálido) y bajo 18°C en el mes más frío.

x: El régimen de lluvias se presenta como intermedios entre el verano e invierno, con porcentaje de lluvia invernal mayor de 18 %.

(e<sup>^</sup>): Oscilación anual de las temperaturas medias mensuales arriba de 18°C (muy extremo).

Según los datos de la Estación Climatológica Marín del departamento de Ingeniería Agrícola de la FAUANL las temperaturas medias anuales son de 22 °C, en los

meses mas fríos (diciembre y enero) las temperaturas son menores de 18 °C, pudiendo ser extremosas, pues la oscilación entre el día y la noche es mayor de 14 °C, mientras que las temperaturas más altas (julio y agosto) son menores de 28 °C. Las temperaturas máximas en esta región se presentan en julio y agosto, siendo éstas superiores a los 28 °C, alcanzando hasta los 45 °C, en los meses más fríos de diciembre a enero, las temperaturas son inferiores a los 18 °C llegando hasta los -7 °C. Las heladas tempranas se establecen en el mes de noviembre y las tardías hasta marzo; las más severas (3 o 4 en promedio) se registran normalmente en el mes de enero. La precipitación pluvial es de 500 mm anuales, con una máxima de 600 mm y una mínima de 200 mm. La mayor parte de éstas distribuyen en dos periodos, de mayo a junio y de agosto a octubre, el resto de los meses se consideran secos. Los días nublados van de 90-110, correspondientes al período de los meses húmedos o lluviosos. En lo referente al granizo, la intensidad anual media es de un día, manifestándose mediante el período de lluvias. Los vientos son masas de aire marítimo tropical provenientes del noreste y del norte, cuyas intensidades son de alrededor de 20 km hr<sup>-1</sup>. Las granizadas ocurren con una intensidad promedio de un día al año, generalmente en los meses de abril y mayo.

### **3.1.3 Suelo**

Los suelos que predominan en la región, de acuerdo a la clasificación de INEGI (2003) son de tipo Feosem calcárico y Regosol calcárico.

Predominan los suelos de color café grisáceo con un pH ligeramente alcalino, con textura franco arcillosa y contenidos de materia orgánica medios. Son medianamente pobres en nitrógeno total, bajo fósforo aprovechable y extremadamente rico en potasio aprovechable. El contenido de sales solubles (conductividad eléctrica) es menor de dos dS.m<sup>-1</sup>, por lo cual se consideran que no son salinos.

### **3.1.4 Vegetación**

Según Rzendowski (1986) la comunidad vegetal es un matorral mediano subperenifolio, caracterizado por especies arbustivas con espinas laterales. La altura de los arbustos varía entre 1 y 3 m. Las plantas dominantes son chaparro prieto (*Acacia rigidula*), granjeno (*Celtis pallida*), guayacan (*Porlieria angustifolia*), palo verde (*Cercidium macrum*), uña de gato (*Acacia greggi*), chaparro amargoso (*Acacia texana*), calderona (*Krameris ramossisima*), crusito (*Condolia lycioidos*) entre otros. Durante la estación húmeda crecen hierbas anuales como *Dyssodia spp.*, *Cynanchum spp.* y *Zephyrantes ssp.* Los zacates importantes que crecen en esta región son: el zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*), zacate mezquite (*Hilaria berlandieri*), pajita tempranera (*Setaria macrostachya*), zacate halli (*Panicum hallii*), navajita roja (*Bouteloua trifida*) y tridente esbelto (*Tridens multicus*).

## **3.2. Experimentos Realizados Para Alcanzar los Objetivos Planteados**

Los experimentos que se realizaron para alcanzar los objetivos planteados en el proyecto “Balance Nutricional del Hierro con Respecto a Otros Nutrientes en Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)”, constaron de dos etapas con seis trabajos experimentales (tres por etapa) con el siguiente esquema de desarrollo:

Primera Etapa. Selección de genotipos Fe-eficientes y Fe-ineficientes.

Experimento I. Tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos.

Experimento II. Cambios del pH de la rizósfera de cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes.

Experimento III. Efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.

Segunda Etapa. Balance nutrimental del frijol.

Experimento IV. Relación del hierro con macro y micronutrientos en frijol (primavera-verano).

Experimento V. Relación del hierro con macro y micronutrientos en frijol (otoño-invierno).

Experimento VI. Efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo.

### **3.3 Primera Etapa: Selección de Genotipos Fe-Eficientes y Fe-Ineficientes**

#### **3.3.1 Experimento I. Tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos**

Uno de los métodos para controlar la deficiencia de hierro es utilizar cultivares resistentes, según lo menciona Chaney (1988). En los recursos de germoplasma de frijol en México, existen materiales con resistencia y susceptibilidad a clorosis férrica, por lo cual es conveniente evaluar dichos genotipos.

##### 3.3.1.1. Desarrollo experimental

Con el objetivo de realizar una clasificación de susceptibilidad o tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol se realizó la presente investigación en el área de invernaderos de la Facultad de Agronomía de la U.A.N.L., localizado en el Km. 17 de la carretera Zuazua-Marín en el municipio de Marín N.L. México. La siembra se realizó en macetas de 6 kg de capacidad, en el ciclo temprano, el 18 de abril de 1996, con tres semillas por maceta y a los quince días se aclaró a dos plántulas por maceta. Se utilizaron diversos cultivares (*cv*) de frijol con suelos calcáreos provenientes del campo experimental de la FAUANL con antecedentes de clorosis férrica en frijol. La selección de los suelos fue de acuerdo al contenido de bicarbonatos ( $\text{HCO}_3$ ) de los suelos del área de influencia de la Facultad de Agronomía, para esto se muestrearon suelos de diferentes



localidades con antecedentes de causar clorosis férrica en frijol. Los cultivares se colocaron en condiciones de intemperie, y se utilizó una maya sombreadora de 8 mm (35 % sombra) para disminuir las altas temperaturas.

### 3.3.1.2. Descripción de los tratamientos

Suelo. Se utilizaron dos suelos diferentes. Las características de los suelos se pueden observar en el Cuadro 5, los procedimientos analíticos utilizados para determinar las diferentes características de los suelos se reportan en el Anexo 1.

Cuadro 5. Características de los suelos utilizados en el experimento para seleccionar los cultivares tolerantes a clorosis férrica.

| Suelo | Textura               | Color       | C.E.<br>(dS m <sup>-1</sup> ) | pH  | HCO <sub>3</sub><br>(me L <sup>-1</sup> ) | CaCO <sub>3</sub><br>% | Fe*<br>ppm |
|-------|-----------------------|-------------|-------------------------------|-----|---|------------------------|------------|
| 1     | Franco arcillo limoso | Café claro  | 4.87                          | 8.1 | 22.2                                      | 12.09                  | 3.8        |
| 2     | Franco arcilloso      | Café oscuro | 4.59                          | 7.8 | 15.8                                      | 13.10                  | 2.3        |

\* Extracción con DTPA.

Cultivares (cv). Los genotipos incluidos en el experimento los proporcionaron el programa de frijol de la UAAAN (19 cv); INIFAP, Río Bravo (5 cv); Facultad de Agronomía de la UASLP (2 cv) y la FAUANL (4 cv) y el Centro de Genética del C.P. (8 cv). En total 38 cv, entre los cuales se encuentran materiales clasificados como susceptibles, moderadamente susceptibles y tolerantes a clorosis férrica y diferentes tipos y colores de testa (pinto americano, pinto negro, bayo, negro, rosa, blanco y amarillo) (Cuadro 6).

### 3.3.1.3. Diseño experimental

Para el experimento se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial y dos repeticiones. Con la combinación de los dos tipos de suelos y los 38 cultivares se tuvieron 76 tratamientos. Para la diferencia de los promedios se utilizó la prueba de Tukey. Los análisis correspondientes se realizaron con el paquete computacional de diseños experimentales FAUANL (Olivares, 1994).

Cuadro 6. Material genético utilizado en el experimento para clasificar los cultivares tolerantes a clorosis férrica.

| Cultivar                                      | Origen                 | Tipo            |
|---|------------------------|-----------------|
| LEF-Flor de Mayo                              | UAAAN- Nav.95          | Flor de Mayo    |
| Flor de Mayo-RMC                              | UAAAN- Dgo.94          | Flor de Mayo    |
| Pinto Mexicano-80                             | UAAAN-Ocampo.95        | Pinto Americano |
| Delicias-71                                   | UAAAN- Ocampo.95       | Pinto Americano |
| Pinto Laguna-87                               | UAAAN-Nav.95           | Pinto Americano |
| Pinto Villa                                   | UAAAN- Nav.95          | Pinto Americano |
| AN-22   | UAAAN- Nav.95          | Pinto Americano |
| Nav-1165                                      | UAAAN- Nav.95          | Pinto Americano |
| Zacatecas-1                                   | UAAAN- Nav.95          | Pinto Americano |
| LEF-25-RB                                     | UAAAN-Ocampo.95        | Pinto Americano |
| Pinto Narro-1                                 | UAAAN- Nav.95          | Pinto Negro     |
| PC-84-92-25                                   | UAAAN- Nav.95          | Bayo Crema      |
| Durango-222                                   | UAAAN- Nav.95          | Bayo Blanco     |
| Bayo Zacatecas                                | UAAAN- Nav.95          | Bayo Blanco     |
| II-952-M-26-IM-72                             | UAAAN- Nav.95          | Bayo Blanco     |
| Manzano                                       | UAAAN-Dgo.94           | Bayo Rosa       |
| PC-146-93-38                                  | UAAAN- Nav.95          | Bayo Rosa       |
| Peruano                                       | UAAAN- Ocampo.95       | Amarillo Crema  |
| Negro Durango                                 | UAAAN- Dgo.94          | Negro           |
| Pinto-114                                     | Río Bravo              | Pinto Americano |
| FE-30-RB                                      | Río Bravo              | Ojo de Cabra    |
| Anzalduas-91                                  | Río Bravo              | Ojo de Cabra    |
| Negro Jamapa                                  | Río Bravo              | Negro           |
| Negro Huasteco-81                             | Río Bravo              | Negro           |
| LEF-IRB                                       | FAUANL                 | Bayo Rosa       |
| Pinto Norteño                                 | FAUANL                 | Pinto Americano |
| Selección-4                                   | FAUANL                 | Pinto Americano |
| Canario-101                                   | FAUANL                 | Amarillo Crema  |
| Negro San Luis                                | FAUASLP                | Negro           |
| Flor de Mayo SLP                              | FAUASLP                | Flor de Mayo    |
| Blanco-370 (1) M <sub>7</sub> P <sub>1</sub>  | Centro de Genética, CP | Blanco          |
| Blanco-370 (2) M <sub>8</sub> P <sub>1</sub>  | Centro de Genética, CP | Blanco          |
| Blanco-370 (3) M <sub>10</sub> P <sub>2</sub> | Centro de Genética, CP | Blanco          |
| Blanco-370 (4) M <sub>11</sub> P <sub>2</sub> | Centro de Genética, CP | Blanco          |
| Blanco-370 (5) M <sub>13</sub> P <sub>1</sub> | Centro de Genética, CP | Blanco          |
| Blanco-370 (6) M <sub>17</sub> P <sub>2</sub> | Centro de Genética, CP | Blanco          |
| Blanco-370 (7) M <sub>20</sub> P <sub>1</sub> | Centro de Genética, CP | Blanco          |
| Blanco-370 (8) M <sub>1</sub> P <sub>1</sub>  | Centro de Genética, CP | Blanco          |

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:  $Y_{ijk} = \mu + S_i + G_j + (SG)_{ij} \epsilon(ijk)$

Para:  $S_i$ . Suelos:  $S_1$  y  $S_2$ ;  $G_j$ . Genotipos:  $cv1, cv2, \dots, cv38$ .

Donde:  $\mu$ . Media general.

$S_i$ . Efecto del i-ésimo suelo.

$G_j$ . Efecto del j-ésimo cultivar.

$(SG)_{ij}$ . Efecto de la interacción entre el i-ésimo suelo y el j-ésimo cultivar.

$\epsilon(ijk)$ . Error experimental de la  $ijk$ -ésima observación.

Las hipótesis estadísticas probadas fueron:

$H_{01}: \sigma^2_S = 0$  Vs.  $H_{a1}: \sigma^2_S \neq 0$

$H_{02}: \sigma^2_G = 0$  Vs.  $H_{a2}: \sigma^2_G \neq 0$

$H_{03}: \sigma^2_{SG} = 0$  Vs.  $H_{a3}: \sigma^2_{SG} \neq 0$

#### 3.3.1.4. Evaluación de los tratamientos

Se utilizó el análisis de varianza para evaluar los síntomas de clorosis férrica observadas en las plantas de frijol.

Reacción a clorosis férrica. Los síntomas de clorosis se observaron al inicio de floración, aproximadamente a los 50 días después de la siembra. Para los diferentes grados de clorosis férrica se utilizó la escala de clasificación de 1 al 5 (Hernández *et al.*, 1996) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Escala de clasificación para los diferentes grados de clorosis férrica de acuerdo a la utilizada por Hernández *et al.* (1996).

| Escala | Descripción   | Clasificación           | Clave |
|--------|---|-------------------------|-------|
| 1      | Coloración normal, hojas de un verde intenso, sin enrollar.                           | Completamente tolerante | CT    |
| 2      | Amarillamiento ligero en los márgenes, hojas de un verde más pálido, sin enrollar.    | Moderadamente tolerante | MT    |
| 3      | Amarillamiento intervenal moderado, principio de clorosis en las hojas, sin enrollar. | Algo susceptible        | MS    |
| 4      | Amarillamiento intenso, clorosis total de hojas con principios de enrollamiento.      | Susceptible.            | S     |
| 5      | Amarillamiento severo con necrosamientos, clorosis total, hojas enrolladas.           | Altamente susceptible   | AS    |

### **3.3.2. Experimento II. Cambios del pH de la rizosfera de cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes**

Algunas especies de plantas dicotiledóneas desarrollaron un mecanismo para acidificar la rizósfera y solubilizar los nutrimentos no disponibles en un medio alcalino. Por lo anterior es importante obtener un método para evaluar los cambios en la rizósfera y así poder seleccionar plantas progenitoras que se puedan utilizar en programas de mejora genética en cuanto a la adaptación a suelos calcáreos.

#### 3.3.2.1. Desarrollo experimental

La etapa experimental se realizó en el laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Agronomía de la U.A.N.L. La siembra se realizó en solución nutrimental con agar (medio de cultivo) solidificada completamente. La semilla se desinfectó previamente con alcohol al 15 % durante 10 segundos y cloro al 4.5 % durante 5 minutos. Las semillas se colocaron en tubos de ensaye de 32 mm de diámetro y 20 cm de longitud (Figura 1), la solución nutrimental (Cuadros 8 y 9) se agregó con la finalidad de suministrar todos los elementos esenciales para la planta (Solución Hoagland modificada por Johnson *et al.*, 1957, tomada de Epstein, 1972) excepto Fe. El agar se usó para obtener un gel en el cual las plantas pudieran crecer y desarrollarse, y el indicador de pH se usó para observar algún cambio de pH en el medio nutritivo. Los tubos de ensaye se colocaron a una temperatura de 25 °C, para observar el crecimiento y desarrollo de las plántulas.

#### Preparación del medio nutritivo

El agar se disolvió en la solución con los nutrimentos disueltos previamente. El pH de la solución se ajustó a 6.8 con NaOH 0.1 N. Se disolvieron 5 g de agar-agar en 1.0 litro de solución nutrimental. Después de que el agar se disolvió, se agregó 0.075 g de indicador de pH (bromocresol púrpura), Olivares (1987). La solución se enfrió a 45°C y después se colocaron 90 cm<sup>3</sup> de solución en cada tubo de ensaye. Los tubos de ensaye y el medio nutritivo se desinfectaron por medio del autoclaveado, antes de la siembra, a 15

lb de presión durante 15 min. Los cambios de pH de la rizósfera (Cambió de color) se midieron a los 25 días. Un color amarillo indicó un decremento del pH (acidificación), y un color púrpura indicó que no hubo cambios en el pH.

Cuadro 8. Componentes químicos y cantidades utilizadas en la solución nutrimental Hoagland modificada por Johnson *et al.*, 1957, tomado de Epstein, 1972. La solución no contiene hierro.

| Compuestos químicos                                     | Peso Molecular | Solución patrón Moles | Solución patrón g/l | Volumen de la solución patrón para un litro de solución nutrimental. ml |
|---|----------------|-----------------------|---------------------|---|
| Macronutrientes:  |                |                       |                     |   |
| KNO <sub>3</sub>  | 101.10         | 1.0                   | 101.10              | 6.0   |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4 H <sub>2</sub> O   | 236.16         | 1.0                   | 236.16              | 4.0   |
| NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>          | 115.08         | 1.0                   | 115.08              | 2.0   |
| MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O                    | 246.49         | 1.0                   | 246.49              | 1.0   |
| Micronutrientes:  |                |                       |                     |   |
| KCl   | 74.55          | 50                    | 3.728               |   |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>                          | 61.84          | 25                    | 1.546               | 1.0   |
| MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O                     | 169.01         | 2.0                   | 0.338               | (de la solución patrón con todos los micronutrientes)                   |
| ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O                    | 287.55         | 2.0                   | 0.575               |   |
| CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O                    | 249.71         | 0.5                   | 0.125               |   |
| H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> (85% MoO <sub>3</sub> ) | 161.97         | 0.5                   | 0.081               |   |

### 3.3.2.2. Descripción de los tratamientos (cultivares)

Se utilizaron cinco cultivares de frijol clasificados en la primera etapa del experimento como tolerantes, moderadamente susceptibles y un susceptible a clorosis férrica:

| Variedad          | Color de testa  | Hábito de crecimiento   | Tolerancia a clorosis férrica |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------|
| AN 22             | Pinto americano | Indeterminado (Tipo II) | Tolerante                     |
| Pinto Mexicano 80 | Pinto americano | Indeterminado (Tipo II) | Tolerante                     |
| Durango 222       | Bayo blanco.    | Indeterminado (Tipo II) | Tolerante                     |
| Lagunero 87       | Pinto americano | Indeterminado (Tipo II) | Mod. Susceptible              |
| Canario 101       | Amarillo crema  | Determinado (Tipo I)    | Susceptible                   |

Cuadro 9. Concentración de los elementos nutrimentales en la solución Hoagland modificada por Johnson *et al.*, 1957, tomado de Epstein, 1972. La solución no contiene hierro.

| Elemento      | Concentración (ppm) |
|---------------|---------------------|
| Nitrógeno, N  | 224.000             |
| Potasio, K    | 235.000             |
| Calcio, Ca    | 160.000             |
| Fósforo, P    | 62.000              |
| Azufre, S     | 32.000              |
| Magnesio, Mg  | 24.000              |
| Cloro, Cl     | 1.770               |
| Boro, B       | 0.270               |
| Manganeso, Mn | 0.110               |
| Zinc, Zn      | 0.131               |
| Cobre, Cu     | 0.032               |
| Molibdeno, Mo | 0.050               |

### 3.3.2.3. Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con seis repeticiones. Para la diferencia entre medias se utilizó la prueba de Tukey. Los análisis correspondientes se realizaron con el paquete computacional de diseños experimentales FAUANL (Olivares, 1994).

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + \epsilon_{ij}$$

Para:  $G_i$ . Genotipos:  $cv_1, cv_2, cv_3, cv_4$  y  $cv_5$ .

Donde:  $Y_{ij}$ . Observación del tratamiento  $i$  en la repetición  $j$ .

$\mu$ . Efecto verdadero de la media general.

$G_i$ . Efecto del  $i$ -ésimo cultivar.

$\epsilon_{ij}$ . Error experimental de la  $i$ -ésima observación.

La hipótesis estadística probada fue:

$H_{01}: cv_1 = cv_2 = \dots = cv_5$  Vs. Al menos dos cultivares  $\neq 0$

#### 3.3.2.4. Evaluación de los tratamientos

Se identificó el pH de la rizósfera. Los cambios de pH de la rizósfera (cambio de color) se midieron a los 25 días después de la siembra. Un color amarillo indicó un decremento del pH (acidificación), y un color púrpura indicó que no hubo cambios en el pH. Se prepararon soluciones nutritivas estándar con diferentes pH para identificar el color del indicador en cada una de ellas, el pH se ajustó con NaOH 0.1 N (alcalino) y con HCl 0.1 N (ácido). Posteriormente el valor del pH de la rizósfera se determinó comparando su color con el color de las soluciones estándar (Figura 2). Los colores obtenidos fueron de un púrpura intenso (pH de 7) a un color amarillo intenso (pH de 3.0).

Fig. 1. Siembra de las diferentes variedades en estudio de frijol, en un medio nutritivo (agar y solución Hoagland) con indicador de pH y esterilizado.

Fig. 2. Diferentes colores indicadores del pH del medio nutritivo. El color púrpura indica un pH alcalino y el color amarillo indica un pH ácido.



### **3.3.3. Experimento III. Efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos**

Las plantas hierro eficientes son capaces de absorber el hierro en condiciones de oxidación, por lo tanto, algunos cultivares podrían no afectar su rendimiento en condiciones de oxidación, causada por déficit de agua en el suelo. Por lo anterior la presente investigación tuvo como objetivo clasificar el grado de clorosis férrica de diferentes materiales de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos con diferentes condiciones de humedad, se evaluaron ocho cultivares de frijol, con dos tipos de suelos calcáreos y dos diferentes condiciones de humedad.

#### 3.3.3.1. Desarrollo experimental

La presente investigación se desarrolló en el área de invernaderos de la Facultad de Agronomía de la U.A.N.L. Se utilizaron camas de 14.6 m de largo por 1.2 m de ancho, en condiciones de intemperie, con suelos calcáreos del Campo Agrícola Experimental de la FAUANL, con antecedentes de clorosis férrica en el cultivo del frijol. Los suelos se recolectaron de los primeros 0-30 cm de profundidad y se les determinó el contenido de carbonatos además de otras características físicas y químicas. La siembra se realizó en el ciclo tardío, el 28 de agosto de 1996, con 20 cm de separación entre plantas y 80 cm entre hileras, con dos semillas por golpe. Se aplicó la fertilización 18-46-00, recomendada por FERTIMEX (1988), para la zona en estudio. Los riegos se aplicaron de acuerdo a los tratamientos. Se utilizó agua de pozo profundo de Marín N.L., cuyas características fueron las siguientes: C.E:  $1.5 \text{ dS m}^{-1}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , pH: 7.03, Ca:  $11.8 \text{ me L}^{-1}$ , Mg:  $6.6 \text{ me L}^{-1}$ , Cl:  $4.0 \text{ me L}^{-1}$ , K: 0.103 ppm y  $\text{NO}_3$ :  $1.25 \text{ me L}^{-1}$ .

#### 3.3.3.2. Descripción y aplicación de los tratamientos

##### Genotipos

Se utilizaron ocho cultivares de frijol clasificados como tolerantes, moderadamente tolerantes y susceptibles a clorosis férrica.

Los cultivares evaluados fueron:

Por su mayor tolerancia a clorosis férrica: Pinto Villa, AN-22, Durango 222, Pinto Mex. 80, FE 30 RB y Navidad 1165.

Por su alta susceptibilidad a clorosis férrica se utilizó el Canario 101.

Como testigo regional se utilizó el Pinto 114 el cual presenta buena adaptación a las condiciones de producción de Marín N.L., grano tipo pinto, hábito de crecimiento arbustivo, por lo que es preferida por los consumidores y productores de esta región.

Los cultivares incluidos en el experimento fueron proporcionados por el programa de frijol de la UAAAN, INIFAP, Río Bravo y la FAUANL, entre los cuales se encuentran materiales clasificados como susceptibles, moderadamente susceptibles y tolerantes a clorosis férrica (Experimento 1) y diferentes tipos y colores de testa (pinto americano, bayo, rosa y amarillo).

### Suelos

Se utilizaron dos suelos con diferente contenido de bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ) soluble, con antecedentes de causar clorosis férrica en frijol, las características de los suelos se pueden observar en el Cuadro 10, los procedimientos analíticos utilizados para determinar las diferentes características de los suelos se reportan en el Anexo 1.

### Humedad del suelo

Se mantuvieron dos condiciones de humedad en el suelo: El primer tratamiento consistió en permitir abatimientos de humedad (A.H) hasta un 70 por ciento de la humedad disponible para la planta; el segundo tratamiento consistió en permitir un abatimiento de humedad solamente del 20 por ciento de la humedad disponible para la planta; con la finalidad de tener diferentes condiciones de humedad en el suelo y evaluar su efecto en la clorosis férrica.

Cuadro 10. Características físicas y químicas y contenido nutrimental de los suelos utilizados en el experimento efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos.

| Suelo           | Textura               | Color       | Da<br>g cm <sup>-3</sup> | M.O.<br>%       | C.E.<br>dS m <sup>-1</sup> | p<br>H | HCO <sub>3</sub><br>me 100 g <sup>-1</sup> | CaCO <sub>3</sub><br>% | CIC<br>me 100 g <sup>-1</sup> |      |     |
|-----------------|-----------------------|-------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|--------|--|------------------------|-------------------------------|------|-----|
| 1               | Franco arcilloso      | Café oscuro | 1.33                     | 2.72            | 5.87                       | 7.9    | 24.4                                       | 13.7                   | 44.89                         |      |     |
| 2               | Franco arcillo limoso | Café claro  | 1.22                     | 1.63            | 2.85                       | 7.8    | 17.5                                       | 12.0                   | 31.95                         |      |     |
| NUTRIMENTOS PPM |                       |             |                          |                 |                            |        |  |                        |                               |      |     |
|                 | NO <sub>3</sub>       | P           | K                        | SO <sub>4</sub> | Ca                         | Mg     | B  | Cu                     | Fe                            | Mn   | Zn  |
| 1               | 6.0                   | 50.0        | 606                      | 650             | 4960                       | 376    | 0.1  | 0.1                    | 1.0                           | 50.0 | 0.5 |
| Nivel*          | C                     | A           | C                        | E               | B                          | B      | C  | C                      | C                             | B    | C   |
| 2               | 7.0                   | 60.0        | 500                      | 170             | 5184                       | 389    | 0.13                                       | 2.3                    | 4.0                           | 25.0 | 0.3 |
| Nivel*          | C                     | A           | C                        | E               | E                          | B      | C  | A                      | C                             | C    | C   |

\* Nivel: C. Critico; B. Bajo; M. Medio; A. Alto; E. Excesivo.

### 3.3.3.3. Diseño experimental

Para el experimento se utilizó un diseño en bloques al azar con un arreglo en parcelas subdivididas y dos repeticiones. Se utilizó la prueba de Tukey para la diferencia entre los promedios, utilizando un nivel de error tipo I al 5 %. Los análisis estadísticos fueron realizados con el programa UANL (Olivares,1994). Se realizó un análisis de correlación con coeficientes de Pearson, utilizando el paquete estadístico del programa SAS System for Windows (SAS, 1996).

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + S_j + \xi_{ij}(a) + Hk + (SH)_{jk} + \xi_{ijk}(b) + Gl + (SG)_{jl} + (HG)_{kl} + (SHG)_{jkl} + \xi_{ijkl}(c).$$

Para:  $\beta_i$ . Repeticiones:  $r_1$  y  $r_2$ .  
 $S_j$ . Suelos:  $S_1$  y  $S_2$ .  
 $Hk$ . Humedad del suelo:  $H_1$  y  $H_2$ .  
 $Gl$ . Genotipos:  $cv_1, cv_2, \dots, cv_8$ .

Donde:  $Y_{ijkl}$  observación del cultivar  $l$  en el nivel de humedad  $k$  en el suelo  $j$  en el bloque  $i$ .

$\mu$ . Media verdadera general.

$\beta_i$ . Efecto del bloque  $i$ .

$S_j$ . Efecto del  $i$ -ésimo suelo.

$\xi_{ij}(a)$ . Error experimental en parcelas grandes.

$H_k$ . Efecto de la  $k$ -ésima humedad del suelo.

$(SH)_{jk}$ . Efecto de la interacción entre el  $i$ -ésimo suelo y la  $k$ -ésima humedad

del suelo.

$\xi_{ijk}(b)$ . Error experimental en subparcelas (parcelas medianas).

$G_l$ . Efecto del  $l$ -ésimo cultivar.

$(SG)_{jl}$ . Efecto de la interacción entre el  $j$ -ésimo suelo y el  $l$ -ésimo cultivar.

$(HG)_{kl}$ . Efecto de la interacción entre la humedad del suelo  $k$  y el cultivar  $l$ .

$(SHG)_{jkl}$ . Efecto de la interacción del suelo  $j$ , humedad  $k$  y cultivar  $l$ .

$\xi_{ijkl}(c)$ . Error experimental en parcelas chicas.

Las hipótesis estadísticas probadas fueron:

$H_{01}: S_1 = S_2 \quad \text{Vs.} \quad H_{a1}: \text{Los suelos son diferentes.}$

$H_{02}: H_1 = H_2 \quad \text{Vs.} \quad H_{a2}: \text{La humedad del suelo es diferente.}$

$H_{03}: G_1 = G_2 = \dots = G_8 \quad \text{Vs.} \quad H_{a3}: \text{Al menos un cultivar diferente.}$

$H_{04}: \text{no hay interacción } S \times H \quad \text{Vs.} \quad H_{a4}: \text{si hay interacción } S \times H.$

$H_{05}: \text{no hay interacción } S \times G \quad \text{Vs.} \quad H_{a5}: \text{si hay interacción } S \times G.$

$H_{06}: \text{no hay interacción } H \times G \quad \text{Vs.} \quad H_{a6}: \text{si hay interacción } H \times G.$

$H_{07}: \text{no hay interacción } S \times H \times G \quad \text{Vs.} \quad H_{a7}: \text{si hay interacción } S \times H \times G.$

#### 3.3.3.4. Evaluación de los tratamientos

Se utilizó el análisis de varianza para determinar el efecto de las diferentes variables sobre el rendimiento y la composición nutricional de las hojas de las plantas. Las variables a continuación se describen.

Reacción a clorosis férrica. Los síntomas de clorosis se observaron al inicio de floración, aproximadamente a los 50 días después de la siembra (Cortinas, 1985). Galván (1983) al estudiar la edad de la planta más apropiada para evaluar la clorosis férrica en 25 genotipos de frijol, encontró que el rendimiento se asocia negativa y significativamente con la lectura de clorosis efectuada a los 56 días después de la

siembra. El sistema de escala de severidad de la clorosis utilizado fue el de la escala 1-5 descrito en la primera etapa del experimento (Cuadro 7).

Parámetros agronómicos y componentes del rendimiento: Días a floración (número de días transcurridos desde la siembra hasta un 50 % de plantas con flor); Rendimiento de grano (se determinó el rendimiento por parcela útil y por planta).

Análisis foliar. Se determinó en cada uno de los tratamientos, el contenido de los nutrimentos en las hojas, cuando el cultivo estuvo en floración. Los nutrimentos fueron N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn. Las hojas enteras muestreadas de diferentes posiciones se lavaron con una solución diluida de detergente libre de fósforo, 0.1 M HCl, y agua pura; y se sometieron a digestión en HNO<sub>3</sub> y se analizaron para cada elemento (Soltanpour *et al.*, 1995). Con los datos del contenido de nutrimentos se obtuvieron las relaciones (proporciones) de los nutrimentos con respecto al Fe. Además se correlacionó el contenido de Fe foliar con el grado de clorosis y rendimiento de grano. Se utilizó el índice de la Desviación del Porcentaje Óptimo (DOP) para la interpretación de los análisis foliares (Montañes *et al.*, 1993).

### **3.4 Segunda Etapa: Balance Nutricional del Frijol**

#### **3.4.1. Experimento IV. Relación del hierro con macro y micronutrimentos en frijol (ciclo p-v)**

Una planta con deficiencia de hierro presenta clorosis por disminución de la cantidad de clorofila, repercutiendo en la eficiencia de la fotosíntesis y en una menor producción de grano, por lo tanto niveles adecuados de hierro evitan la clorosis, favorece el balance nutricional e incrementa el rendimiento de grano. El presente trabajo se realizó para determinar el efecto de la deficiencia de hierro (clorosis férrica) en el balance nutricional (relación del hierro con algunos macro y micronutrimentos), rendimiento y sus componentes en plantas de frijol hierro eficientes e ineficientes. Se

probaron tres cultivares de frijol (Lagunero 87, AN-22 y Canario 101) en hidroponía con cuatro dosis de Fe (0.4, 1.2, 2.4 y 6.0 ppm) en la solución Hoagland 2. Se utilizó la hidroponía para evitar la interacción con otros factores que pudieran interferir en la disponibilidad del hierro para la planta.

#### 3.4.1.1. Desarrollo experimental

La presente investigación se desarrolló en el área de invernaderos de la Facultad de Agronomía de la U.A.N.L. Se utilizaron cuatro módulos de hidroponía. Cada módulo consistió de tres tubos de 4" de diámetro y 6 m de largo, con capacidad de 120 plantas por módulo. Se aplicaron cuatro soluciones nutritivas una por módulo, una vez por semana, el pH de la solución nutritiva varió entre 6 y 6.5.

#### 3.4.1.2. Descripción de los tratamientos

##### Cultivares.

Se utilizaron tres cultivares de frijol clasificados en la primera etapa del experimento como tolerante, moderadamente susceptible y un susceptible a clorosis férrica.

Tolerante: AN-22. Hábito de crecimiento tipo II (indeterminado). Color de testa pinto.

Semitolerante: Lagunero 87. Hábito de crecimiento tipo II (indeterminado). Color de testa pinto.

Susceptible: Canario 101. Hábito de crecimiento tipo I (determinado). Color de testa amarillo crema.

### Soluciones nutritivas.

Se utilizó una solución nutritiva con cuatro dosis diferentes de hierro. Las soluciones se aplicaron junto con el agua de riego. Se utilizó la solución nutritiva Hoagland modificada por Johnson *et al.* (1957), citada por Epstein (1972). Cuadros 8 y 9. La solución Madre combinada contenía todos los micronutrientes excepto hierro.

Las dosis de hierro fueron de: 0.4, 1.2, 2.4 y 6.0 ppm, con base en la dosis de 1.12 ppm de hierro (20  $\mu$ M).

#### 3.4.1.3. Diseño experimental

Para el experimento se utilizó un diseño en bloques al azar con arreglo factorial y tres repeticiones. Para la diferencia de los promedios se utilizó la prueba de Tukey, utilizando un nivel de error tipo I al 5 %. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa SAS System for Windows (1996). Se realizó un análisis de correlación con coeficientes de Pearson, utilizando el paquete estadístico del programa SAS.

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + S_j + G_k + (SG)_{jk} + \epsilon_{ijk}$$

Para:  $\beta_i$ . Repeticiones:  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$ .

$S_j$  Solución con diferente nivel de Fe:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  y  $S_4$ .

$G_l$ . Genotipos:  $cv_1$ ,  $cv_2$ ,  $y$ ,  $cv_3$ .

Donde:  $Y_{ijk}$  Observación del cultivar  $l$  en la solución  $k$  en el bloque  $i$ .

$\mu$ . Media verdadera general.

$\beta_i$ . Efecto del bloque  $i$ .

$S_j$ . Efecto del nivel  $j$ -ésimo de hierro.

$G_k$ . Efecto del  $k$ -ésimo cultivar.

$(SG)_{jk}$ . Efecto de la interacción entre la  $j$ -ésima solución y el  $k$ -ésimo cultivar.

$\epsilon_{ijk}$ . Error experimental.

Las hipótesis estadísticas probadas fueron:

- Ho<sub>1</sub>: S<sub>1</sub> = S<sub>2</sub> = S<sub>3</sub> = S<sub>4</sub> Vs. Ha<sub>1</sub>: Las soluciones con diferente contenido de Fe tienen efectos diferentes.
- Ho<sub>2</sub>: G<sub>1</sub> = G<sub>2</sub> = G<sub>3</sub> Vs. Ha<sub>2</sub>: Al menos un cultivar es diferente.
- Ho<sub>3</sub>: no hay interacción SxG Vs Ha<sub>3</sub>: si hay interacción SxG.

#### 3.4.1.4. Evaluación de los tratamientos

Se utilizó el Análisis de varianza para determinar el efecto de las diferentes variables sobre el rendimiento y la composición nutrimental de las hojas de las plantas. Las variables a continuación se describen.

Análisis foliar. Cuando el cultivo tenía el 50 % de floración se determinó el contenido nutrimental de la planta. Por medio del análisis foliar se determinó el contenido de Fe, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn y clorofila en cada uno de los tratamientos. Con estos datos se determinó las relaciones (proporciones) de los nutrimentos con respecto al hierro de cada una de las soluciones aplicadas y se relacionó con el contenido de clorofila, grado de clorosis y rendimiento de grano. Se utilizó el índice de la Desviación del Porcentaje Óptimo (DOP) para la interpretación de los análisis foliares (Montañes *et al.*, 1993).

Contenido de clorofila (mg L<sup>-1</sup>) en folíolos. Los folíolos de las plantas de frijol se lavaron con agua bidestilada y se determinó el contenido de clorofila por el método reportado por Gutiérrez *et al.* (1994) para medir clorofila a, b y total. La concentración de la clorofila del extracto se determinó en un espectrofotómetro Turner Modelo 690, a 645 y 663 nm.

Parámetros agronómicos (Altura de planta, índice de área foliar), componentes del rendimiento y rendimiento (biomasa y grano).



Clorosis. Los síntomas de clorosis se observaron al inicio de floración. El sistema de escala de severidad de la clorosis se relacionó con la concentración de clorofila en hojas, y a la reducción del rendimiento causada por la clorosis.

### **3.4.2. Experimento V. Relación del hierro con macro y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)**

En el ciclo P-V, debido a las altas temperaturas, los cultivares presentaron poca floración y algunos no florecieron, por lo que no se obtuvo producción de grano en los cultivares en estudio. Debido a lo anterior se planteó realizar el mismo experimento en condiciones más favorables para el cultivo en el ciclo Otoño Invierno.

El presente trabajo al igual que el experimento IV, se realizó con la finalidad de encontrar el adecuado balance de nutrientes con respecto al hierro en la planta que permita la máxima producción del cultivo de acuerdo a su potencial genético y determinar el efecto de la deficiencia de hierro (clorosis férrica) en el rendimiento y sus componentes en frijol. Se probaron cuatro dosis de Fe (0.9, 1.2, 2.4 y 8.6 ppm) en la solución Hoagland 2, con tres variedades de frijol (Lagunero 87, AN-22 y Canario 101).

Por lo anterior el diseño experimental y la evaluación de los tratamientos, corresponden al experimento número IV por tener el mismo objetivo, solo cambia la fecha de siembra y se realizó un ajuste a los niveles de Fe en las soluciones nutritivas.

### **3.4.3. Experimento VI. Efecto de los fertilizantes en el balance nutricional y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo**

#### 3.4.3.1. Desarrollo experimental

La presente investigación se desarrolló en el Campo Agrícola Experimental de la Facultad de Agronomía de la U.A.N.L. La siembra se realizó el tres de septiembre de

1997 en seco, previamente se aplicaron los tratamientos de fertilización al suelo. Las características del suelo se pueden observar en el Cuadro 11; los procedimientos analíticos utilizados para determinar las diferentes características del suelo se reportan en el Anexo 1. El terreno seleccionado tenía antecedentes de causar clorosis férrica en frijol.

Cuadro 11. Características físicas y químicas y contenido nutrimental del suelo utilizado en el experimento efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol.

| Textura              | Color         | Da<br>g cm <sup>-3</sup> | M.O.<br>% | C.E.<br>dS m <sup>-1</sup> | pH  | HCO <sub>3</sub><br>me 100 g <sup>-1</sup> | CaCO <sub>3</sub><br>% | CIC<br>me 100 g <sup>-1</sup> |
|----------------------|---------------|--------------------------|-----------|----------------------------|-----|--|------------------------|-------------------------------|
| Migajón<br>arcilloso | Café<br>claro | 1.25                     | 1.60      | 1.79                       | 8.0 | 3.36                                       | 13.87                  | 31.95                         |
| NUTRIMENTO, PPM      |               |                          |           |                            |     |  |                        |                               |
| N<br>inorgánico      | P             | K                        | Ca        | Mg                         | Cu  | Fe   | Mn                     | Zn                            |
| 77                   | 16.5          | 284                      | 3547      | 24                         | 0.9 | 2.4  | 32.4                   | 0.3                           |
| MR                   | M             | R                        | R         | P                          | M   | MP   | MR                     | MP                            |

\* Nivel: MR, muy rico; R, rico; M, mediano; P, pobre y MP, muy pobre.

#### 3.4.3.2. Descripción de los tratamientos

Se utilizaron quince productos químicos clasificados como fertilizantes y quelatos:

Fertilizantes y quelatos: 1. Fe-EDDHA, 9% Fe. (Maxiquel) al suelo. 2. Fe-EDDHA, 9% Fe. (Maxiquel) Foliar. 3. Fe-EDTA, 9 % Fe. (Kelatex) al suelo. 4. Fe-EDTA, 9 % Fe. (Kelatex) Foliar. 5. Sulfato ferroso, al suelo. 6. Sulfato ferroso, foliar. 7. Testigo fertilizado (fórmula: 20-80-00 con urea, 46 %N y Superfosfato de calcio triple, 46 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). 8. Testigo sin fertilizar (Testigo absoluto). 9. Sulfato de amonio. 10. Nitrato de amonio. 11. Fosfato monoamónico. 12. Ácido sulfúrico. 13. Ácido fosfórico (Dosis de fertilizante). 14. Ácido húmico y ácido fúlvico (Humitron). 15. Fertilización ácida (20-80-00 con Urea ácida (30-0-0-5) más Ácido fosfórico 85 % (61.5 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

Cultivares Se utilizaron tres cultivares de frijol con las siguientes características:

| Cultivar    | Tipo de crecimiento    | Color de testa | Susceptibilidad a clorosis férrica. |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------------------|
| AN-22       | Tipo II, indeterminado | Pinto          | Tolerante                           |
| LAGUNERO 87 | Tipo II, indeterminado | Pinto          | Moderadamente tolerante             |
| CANARIO 101 | Tipo I, determinado    | Amarillo crema | Susceptible                         |

### 3.4.3.3. Diseño experimental

Se utilizó un diseño en bloques al azar con distribución en bloques divididos (arreglo en franjas) y tres repeticiones. Para la diferencia de medias se utilizó la prueba de Tukey, utilizando un nivel de error tipo I al 5 %. Los análisis estadísticos fueron realizados con el programa SAS System for Windows (SAS, 1996). Se realizó un análisis de correlación con coeficientes de Pearson, utilizando el paquete estadístico del programa SAS.

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + G_j + \xi_{ij}(a) + F_k + \xi_{ik}(b) + (GF)_{jk} + \xi_{ijk}(c).$$

Para:  $\beta_i$ . Repeticiones:  $r_1, r_2$  y  $r_3$ .

$G_j$ . Genotipos:  $cv_1, cv_2, cv_3$ .

$F_k$ . Fertilizantes y quelatos:  $F_1, F_2, \dots, F_{15}$ .

*Donde:*  $Y_{ijk}$  Observación del fertilizante o quelato  $k$  en el cultivar  $j$  en el bloque  $i$ .

$\mu$ . Media verdadera general.

$\beta_i$ . Efecto del bloque  $i$ .

$G_j$ . Efecto del  $j$ -ésimo cultivar.

$\xi_{ij}(a)$ . Error experimental de la  $ij$ -ésima parcela grande para cultivares.

$F_k$ . Efecto del  $k$ -ésimo fertilizante o quelato.

$\xi_{ik}(b)$ . Error experimental de la  $ik$ -ésima parcela grande para fertilizantes o quelatos.

$(GF)_{jk}$ . Efecto de la interacción del cultivar  $j$  y el fertilizante o quelato  $k$ .

$\xi_{ijk}(c)$ . Error experimental de la  $ijk$ -ésima subparcela.

Las hipótesis estadísticas probadas fueron:

Ho<sub>1</sub>: G<sub>1</sub> = G<sub>2</sub> = G<sub>3</sub> Vs. Ha<sub>1</sub>: Al menos un cultivar diferente.

Ho<sub>2</sub>: F<sub>1</sub> = F<sub>2</sub> = ... = F<sub>15</sub> Vs. Ha<sub>2</sub>: Los fertilizantes o quelatos son diferentes.

Ho<sub>3</sub>: no hay interacción GxF Vs. Ha<sub>3</sub>: si hay interacción GxF.

#### 3.4.3.4. Evaluación de los tratamientos

Se utilizó el análisis de varianza para determinar el efecto de las diferentes variables sobre el rendimiento y la composición nutrimental de las hojas de las plantas. Las variables a continuación se describen.

Análisis foliar. Cuando el cultivo tenía el 50 % de floración se determinó el contenido nutrimental de la planta. Por medio del análisis foliar se determinó el contenido de Fe, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn y clorofila en cada uno de los tratamientos. Con estos datos se determinaron las relaciones (proporciones) de los nutrimentos con respecto al hierro de cada una de las soluciones aplicadas y se relacionó con el contenido de clorofila, grado de clorosis y rendimiento de grano. Se utilizó el índice de la Desviación del Porcentaje Óptimo (DOP) para la interpretación de los análisis foliares (Montañes *et al.*, 1993).

Contenido de clorofila (mg L<sup>-1</sup>). Los folíolos de las plantas de frijol se lavaron con agua bidestilada y se determinó el contenido de clorofila por el método reportado por Gutiérrez *et al.* (1994) para clorofila a, b y total. La concentración de la clorofila del extracto se determinó en un espectrofotómetro Turner Modelo 690, a 645 y 663 nm.

Parámetros agronómicos (altura de planta, índice de área foliar), componentes del rendimiento y rendimiento (biomasa y grano).

Clorosis. Los síntomas de clorosis se observaron al inicio de floración. El sistema de escala de la severidad de la clorosis se relacionó con la concentración de clorofila en hojas, y a la reducción del rendimiento causada por la clorosis.

## V. CONCLUSIONES

### **Primera Etapa: Selección de Cultivares Fe-Eficientes**

#### **Experimento I. Tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos**

Los dos suelos evaluados causaron diferentes grados de clorosis férrica en los cultivares de frijol, presentando mayor clorosis los cultivares desarrollados en el suelo migajon arcilloso con 2.3 ppm de Fe disponible en comparación con el suelo franco arcillo limoso con 3.8 ppm de Fe disponible.

De acuerdo al grado de clorosis férrica mostrado por los cultivares los cultivares que se clasificaron de la siguiente manera:

**Completamente Tolerante:** Pinto Villa.

**Moderadamente Tolerantes:** AN-22, Pinto Mex. 80, Navidad 1165, , Durango 222 y Bco. 370 (3).

**Moderadamente Susceptibles:** Negro San Luis, FE-30-RB, LEF- Flor de Mayo, Flor de Mayo SLP, Delicias 71, Bayo Zacatecas, PC-84-92-25, Zacatecas 1, Bco. 370 (8), Bco. 370 (4), Bco. 370 (6), Bco. 370 (2) y Bco. 370 (5).

**Susceptibles:** PC-148-93-38, Peruano, Manzano, Negro Jamapa, Flor de Mayo RMC, Selección 4, Pinto 114, LEF-IRB, Pinto Norteño, Pinto Laguna, Negro Durango, Anzalduaz 91, Pinto Narro 1, LEF-25-RB, Bco. 370 (1) y Bco. 370 (7).

**Altamente susceptibles:** Negro Huasteco 81, II-952-M-26-1M-72 y Canario 101.

## **Experimento II. Cambios del pH de la rizósfera de cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes**

Las variedades de Frijol Fe-eficientes AN 22 y Pinto Mexicano 80 mostraron mayor capacidad de acidificar el pH de la rizósfera, hasta valores menores de 3.0.

Las variedades Durango 222 y el Lagunero 87 no presentaron la capacidad de reducir el pH de la rizósfera.

La variedad susceptible a clorosis férrica (Canario 101) tiene cierta capacidad de acidificar la rizósfera, pero no con la amplitud que tienen las variedades Fe eficientes.

La metodología utilizada para detectar los cambios del pH de la rizósfera es adecuada para discriminar entre variedades de frijol en cuanto a esta característica.

La técnica puede ser utilizada en la identificación de progenitores y en la selección de plántulas segregantes Fe-eficientes en programas de mejoramiento genético para variedades adaptadas ha suelos alcalinos.

## **Experimento III: Efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos**

Independientemente del tipo de suelo, el cultivar Canario 101 utilizado como testigo Fe-ineficiente, presentó un crecimiento determinado y fue el que mostró mayor grado de clorosis férrica con menor producción de materia seca y grano por planta.

Los genotipos Durango 222 y el AN 22, presentaron un crecimiento indeterminado y fueron los de menor grado de clorosis férrica con mayor producción de materia seca y grano por planta.

Se encontró diferencia en el rendimiento por efecto de las diferentes condiciones de humedad, pero no en el grado de clorosis, probablemente por que se requiere de condiciones de inundación por periodos prolongados para alcanzar las condiciones de reducción del hierro.

## **Segunda Etapa: Balance Nutricional de Cultivares de Frijol Fe-Eficientes y Fe-Ineficientes**

### **Experimento IV. Balance nutricional del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)**

La aplicación de 0.4 ppm de Fe en la solución nutriente causó un menor contenido de Clorofila a, b y total, además disminuyó la proporción clorofila a/b, lo que causó síntomas de clorosis férrica en las variedades en estudio. Esto disminuyó la altura, el área foliar y la producción de materia seca por planta, además de retrasar la floración.

La variedad canario 101 presentó mayor clorosis férrica y menores contenidos de clorofila.

### **Experimento V. Balance nutricional del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)**

El contenido de clorofila a y la relación clorofila a:b, determinó el grado de clorosis férrica en los cultivares en estudio.

El cultivar Canario 101 aunque presentó contenidos adecuados de Fe en las hojas, presentó mayor grado de clorosis férrica debido a su menor contenido de clorofila y no disponer del Fe probablemente por su pH interno alcalino.

Los cultivares de frijol Fe-eficientes, tolerantes a clorosis férrica fueron afectados menos en su rendimiento que los cultivares susceptibles.

## **Experimento VI. Efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol**

La aplicación en forma foliar y al suelo de hierro por medio de fertilizantes y quelatos, no corrigieron el grado de clorosis ni incrementaron el contenido de clorofila en las hojas, al igual que los fertilizantes de reacción ácida, pero incrementaron el rendimiento de grano.

Los cultivares de mayor rendimiento de grano fueron el AN-22 y el Lagunero 87. El cultivar Canario 101 presentó un menor contenido de Clorofila a, b y total, además disminuyó la proporción clorofila a/b, lo que causó síntomas de clorosis férrica y menor rendimiento de grano. La variedad AN-22 (Fe-eficiente) no presentó diferencia significativa en el contenido de clorofila y clorosis férrica en comparación con la variedad Lagunero 87 (Moderadamente tolerante a la clorosis férrica) y obtuvo mayor rendimiento de materia seca y grano por planta.

El cultivar AN-22 presentó ligera clorosis en condiciones de campo, siendo afectada por el medio ambiente, por lo que la clasificación de Fe-eficiente, requiere de la evaluación en un número mayor de ciclos para considerarla 100 % Fe-eficiente.

El elemento con mayor requerimiento fue el Zn aunque no fue el causante de la clorosis del cultivo, pero sí influyó en la menor producción de biomasa y grano de los cultivares.

La clorosis férrica depende del contenido de clorofila y no de la concentración de Fe foliar.

Los cultivares de frijol Fe-eficientes, tolerantes a clorosis férrica fueron afectados menos en su rendimiento que los cultivares susceptibles, cuando se cultivan en suelos calcáreos.

Para resolver el problema de la clorosis férrica en frijol, las líneas de investigación deben centrarse en la evaluación de cultivares para detectar los Fe-eficientes y así contribuir al control integrado para evitar los daños causados por la clorosis férrica.



## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los trabajos experimentales se presentan por separado, de acuerdo al orden del diagrama presentado en Materiales y Métodos, donde se atiende cada uno de acuerdo a sus hipótesis y objetivos particulares.

### 4.1 Primera Etapa. Selección de Cultivares Fe-Eficientes

#### 4.1.1 Experimento I. Tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos

Aunque el Fe es abundante en muchos suelos, el pH alcalino ocasiona que las deficiencias de P y Fe sean comunes. Uno de los métodos para controlar la deficiencia de Fe incluye el uso de variedades resistentes (Chaney, 1988). En los recursos de germoplasma de frijol de México existen materiales capaces de absorber hierro en condiciones de baja disponibilidad del mismo, los cuales se les conoce como hierro eficientes, por lo tanto dentro de los genotipos comerciales utilizados en la zona existen plantas hierro eficientes, que pueden desarrollarse en suelos calcáreos. Por lo anterior el objetivo del presente trabajo de investigación es clasificar el grado de tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos en condiciones de invernadero.

Con el análisis de varianza se puede observar que hubo diferencias altamente significativas entre tratamientos (Cuadro 12), tanto para los tipos de suelo como para los cultivares, no encontrando diferencia para la interacción.

Cuadro 12. Análisis de varianza para el grado de clorosis presentado por los diferentes cultivares de frijol a los 50 días después de la emergencia.

| F.V.        | g.l. | S.C.       | C.M.     | Fcal.      | F tablas      |               |
|-------------|------|------------|----------|------------|---------------|---------------|
|             |      |            |          |            | $\alpha=0.05$ | $\alpha=0.01$ |
| Suelo       | 1    | 4.080078   | 4.080078 | 30.2516 ** | 3.91          | 6.81          |
| Cultivares  | 37   | 162.856445 | 4.401525 | 32.6349 ** | 1.47          | 1.72          |
| Interacción | 37   | 4.127686   | 0.111559 | 00.8271 NS | 1.47          | 1.72          |
| Error       | 152  | 20.500488  | 0.134872 |            |               |               |
| Total       | 227  | 191.564697 |          |            |               |               |

C.V.= 10.58 %

La prueba de medias (tukey, 0.05) para los suelos muestra que son diferentes en su capacidad para causar clorosis férrica; en las plantas cultivadas en los dos tipos de suelos se presentó clorosis férrica, debido a sus características como pH alcalino, contenido de bicarbonatos y bajo contenido de Fe disponible, causando mayor clorosis el suelo franco arcilloso con 2.3 ppm de Fe disponible que el suelo franco arcillo limoso con 3.8 ppm de Fe disponible. En general el contenido de Fe disponible en el suelo se considera bajo de acuerdo a Jones (2001) quien señala que contenidos menores de 3 ppm de Fe soluble en el suelo son bajos y contenidos mayores de 5 ppm son adecuados para el desarrollo de los cultivos.

Las plantas de acuerdo a la escala 1-5 utilizada por Hernández *et al.* (1996), se clasifican como susceptibles (S) las colocadas en el suelo franco arcillo limoso y moderadamente susceptibles (MS) las del franco arcilloso:

| Suelo                     | Clorosis a los 50 días | Grupo |
|---------------------------|------------------------|-------|
| 1. Franco Arcillo Limoso. | 3.61                   | a     |
| 2. Franco Arcilloso.      | 3.34                   | b     |

Para los cultivares la prueba de medias (Tukey, 0.05) conforma 13 grupos diferentes (Cuadro 13) destacándose el grupo “a” que integra los cultivares altamente susceptibles hasta los susceptibles; el grupo “g” que integra los cultivares moderadamente susceptibles y los grupos “l y m” que integran a los cultivares moderadamente tolerantes y completamente tolerantes. De acuerdo al grado de clorosis férrica mostrado por los cultivares, estos se clasificaron de la siguiente manera: Completamente Tolerante: Pinto Villa; Moderadamente Tolerante: AN-22, Pinto Méx. 80, Navidad 1165, Durango 222 y Bco. 370 (3); Moderadamente Susceptibles: Negro San Luis, FE-30-RB, LEF- Flor de Mayo, Flor de Mayo SLP, Delicias 71, Bayo Zacatecas, PC-84-92-25, Zacatecas 1, Bco. 370 (8), Bco. 370 (4), Bco. 370 (6), Bco. 370 (2) y Bco. 370 (5); Susceptibles: PC-148-93-38, Peruano, Manzano, Negro Jamapa, Flor de Mayo RMC, Selección 4, Pinto 114, LEF-IRB, Pinto Norteño, Pinto Laguna, Negro Durango, Anzalduaz 91, Pinto Narro 1, LEF-25-RB, Bco. 370 (1) y Bco. 370 (7); Altamente Susceptibles: Negro Huasteco 81, II-952-M-26-1M-72 y Canario 101.

Cuadro 13. Principales grupos conformados por la prueba de medias para grado de clorosis férrica presentado a los 50 días por los diferentes cultivares en estudio y su clasificación de acuerdo a la tolerancia a la clorosis férrica.

| No. | Cultivar            | Clorosis 45 días <sup>1</sup> | Grupos conformados por la prueba de Tukey <sup>2</sup> | Tolerancia a clorosis férrica <sup>3</sup> |
|-----|---------------------|-------------------------------|--|--|
| 37  | Negro Huasteco 81   | 4.58                          | a  | A S  |
| 38  | II- 952-M-26-1M-72  | 4.58                          | a  | A S  |
| 15  | Canario 101         | 4.50                          | a b  | A S  |
| 33  | PC-146-93-38        | 4.33                          | a b c  | S  |
| 35  | Peruano             | 4.33                          | a b c  | S  |
| 34  | Manzano             | 4.25                          | a b c  | S  |
| 31  | Negro Jamapa        | 4.25                          | a b c  | S  |
| 32  | Flor de Mayo RMC    | 4.25                          | a b c  | S  |
| 30  | Selección 4         | 4.25                          | a b c  | S  |
| 11  | Pinto 114           | 4.17                          | a b c  | S  |
| 29  | LEF-IRB             | 4.17                          | a b c  | S  |
| 24  | Pinto Norteño       | 4.08                          | a b c d  | S  |
| 25  | Pinto Laguna        | 4.00                          | a b c d e  | S  |
| 36  | Negro Durango       | 4.00                          | a b c d e  | S  |
| 7   | Bco-370 (7)         | 3.92                          | a b c d e  | S  |
| 21  | Anzalduaz 91        | 3.92                          | a b c d e  | S  |
| 18  | Pinto Narro 1       | 3.83                          | a b c d e  | S  |
| 22  | LEF-25-RB           | 3.83                          | a b c d e  | S  |
| 1   | Bco. 370 (1)        | 3.75                          | b c d e f  | S  |
| 5   | Bco. 370 (5)        | 3.58                          | c d e f g  | M S  |
| 20  | Negro San Luis      | 3.33                          | d e f g h  | M S  |
| 2   | Bco. 370 (2)        | 3.33                          | d e f g h  | M S  |
| 12  | FE-30-RB            | 3.33                          | d e f g h  | M S  |
| 6   | Bco. 370 (6)        | 3.33                          | d e f g h  | M S  |
| 4   | Bco. 370 (4)        | 3.33                          | d e f g h  | M S  |
| 26  | LEF-Flor de Mayo    | 3.25                          | e f g h  | M S  |
| 28  | Flor de Mayo S.L.P. | 3.25                          | e f g h  | M S  |
| 19  | Delicias 71         | 3.25                          | e f g h  | M S  |
| 17  | Bayo Zacatecaz      | 3.00                          | f g h i  | M S  |
| 27  | PC-84-92-25         | 2.92                          | g h i j  | M S  |
| 23  | Zacatecaz 1         | 2.83                          | g h i j  | M S  |
| 8   | Bco. 370 (8)        | 2.75                          | h i j k  | M S  |
| 3   | Bco. 370 (3)        | 2.25                          | i j k l  | M T  |
| 16  | AN-22               | 2.17                          | j k l  | M T  |
| 9   | Pinto Méx. 80       | 2.00                          | k l m  | M T  |
| 13  | Navidad 1165        | 2.00                          | k l m  | M T  |
| 14  | Durango 222         | 1.67                          | l m  | M T  |
| 10  | Pinto Villa         | 1.33                          | m  | C T  |

<sup>1</sup> Escala 1-5 (Hernández, 1996).

<sup>2</sup> Medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05 = 0.7511).

<sup>3</sup> AS. Altamente susceptible, S. Susceptible, M.S. Moderadamente susceptible, MT. Moderadamente tolerante y CT. Completamente tolerante.

Los resultados de los cultivares estudiados coinciden con los reportados por Hernández *et al.* (1996) en considerar como Fe-ineficientes a: Flor de mayo, Delicias 71, Negro Huasteco 81, Negro Zacatecas y Manzano, identificados por su alta susceptibilidad a clorosis férrica, además del Negro Jamapa y el Pinto 114, clasificado por los mismos investigadores como altamente susceptible y moderadamente susceptible, respectivamente.

A pesar de que el Fe se encuentra en el suelo en cantidades muy pobres (2.3 y 3.8 ppm) los cultivares clasificados como completamente tolerantes (Pinto Villa) y moderadamente tolerantes (AN-22, Pinto Mex. 80, Navidad 1165, Durango 222 y Bco. 370 (3)), muestran capacidad de incrementar el Fe disponible para utilizarlo en sus tejidos, existiendo la posibilidad de que los cultivares tengan cierta selectividad de absorber  $\text{Fe}^{+2}$ , mediante mecanismos como la acidificación de la rizósfera, ya que en los suelos calcáreos el Fe se encuentra en forma férrica no disponible para la planta (Loué, 1988), al acidificar el medio, el Fe se reduce y pasa a la forma ferrosa que es disponible para la planta, otro mecanismo podría activar las reductasas en el plasmalema de las células de la epidermis de la raíz (Marschner, 2002).

Conviene considerar que algunas plantas manifiestan síntomas de clorosis férrica, aun con contenidos adecuados de Fe en las hojas, debido a que la planta no metaboliza dicho elemento, ya que la reducción del  $\text{Fe}^{+3}$  en la hoja se afecta negativamente por el pH elevado, siendo una de las posibles causas de la clorosis férrica (Romera y Díaz, 1991).

Los cultivares tolerantes a clorosis férrica en suelos calcáreos se pueden utilizar en programas de selección genética con la finalidad de reducir pérdidas en el rendimiento a causa de la deficiencia de hierro.

Los genotipos que se seleccionaron para realizar la etapa del experimento efecto de la humedad del suelo en la clorosis férrica fueron: Por su mayor tolerancia a clorosis férrica: Pinto Villa, AN-22, Durango 222, Pinto Mex. 80, y Navidad 1165; por ser

moderadamente susceptible: FE-30-RB y por su alta susceptibilidad a clorosis férrica: Canario 101. Como testigo regional: Pinto 114, el cual presenta buena adaptación a las condiciones de producción de Marín N.L. y grano tipo pinto, hábito de crecimiento arbustivo, por lo anterior es preferida por los consumidores y productores de esta región.

#### **4.1.2 Experimento II. Cambios del pH de la rizósfera de cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes**

Las plantas dicotiledóneas tienen mecanismos para incrementar la disponibilidad de los nutrimentos del suelo por medio de acidificación de la rizósfera. A las plantas que tienen la capacidad de acidificar la rizósfera para incrementar la disponibilidad del hierro, se les conoce como Fe-eficientes. Con la finalidad de determinar si alguno de los cultivares de frijol clasificados en el experimento anterior como Fe-eficientes, tenían la capacidad de acidificar la rizósfera se realizó el presente trabajo evaluando los cambios de pH generados en la rizósfera de plantas de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes sometidas a deficiencia de hierro colocando los materiales en un medio nutritivo con agar y un indicador de pH.

El valor del pH modificado por la planta se determinó en el sustrato (rizósfera) por medio de comparación con el color obtenido en el medio con el indicador de pH. El pH se ajustó con NaOH 0.1 N (alcalino) y con HCl 0.1 N (ácido). Los colores obtenidos en el medio se pueden observar en el Cuadro 14 y Figura 2.

**Cuadro 14. Color obtenido en el sustrato con diferente pH.**

| pH  | Color del sustrato, con indicador |
|-----|-----------------------------------|
| 7.0 | Púrpura                           |
| 6.5 | Púrpura                           |
| 6.0 | Púrpura vino                      |
| 5.5 | Vino                              |
| 5.0 | Vino                              |
| 4.5 | Vino amarillo                     |
| 4.0 | Amarillo vino                     |
| 3.5 | Amarillo                          |
| 3.0 | Amarillo intenso                  |

Como algunos materiales cambiaron el pH del medio aún por debajo de la raíz, se procedió a ponderar el valor del pH mínimo y máximo obtenido en la zona de influencia de la raíz con el porcentaje del sustrato con cambio y sin cambio de pH. Los resultados ponderados se observan en el Cuadro 16.

Para conocer si los valores obtenidos de pH y pH ponderado mostraban diferencia entre las variedades, se realizó el análisis de varianza por medio del diseño completamente al azar. Se encontró diferencia altamente significativa entre los tratamientos (Cuadro 15).

Cuadro 15. Cuadros medios del análisis de varianza para pH de la rizósfera de los diferentes cultivares en estudio.

| Variable                  | gl | C.M.     | C.V. % |
|---------------------------|----|----------|--------|
| Cultivares (pH)           | 4  | 12.47 ** | 10.42  |
| Error                     | 25 | 0.223    |        |
| Cultivares (pH Ponderado) | 4  | 05.81 ** | 9.68   |
| Error                     | 25 | 0.2115   |        |

Para la diferencia entre los promedios de los tratamientos se utilizó la prueba de Tukey, la cual separa las variedades AN 22 y Pinto Mexicano 80 como las variedades con mayor capacidad de acidificar la rizósfera, las variedades que no mostraron cambios fueron el Durango 222 y el Lagunero 87 (Cuadro 16).

Cuadro 16. Prueba de medias para los promedios de pH de las diferentes variedades en estudio.

| VARIEDAD          | pH     | pH Ponderado |
|-------------------|--------|--------------|
| AN 22             | 3.00 c | 3.46 d       |
| Pinto Mexicano 80 | 3.25 c | 4.18 c d     |
| Durango 222       | 6.00 a | 5.95 a       |
| Lagunero 87       | 6.00 a | 5.41 a b     |
| Canario 101       | 4.42 b | 4.77 b c     |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

Las variedades AN 22 y Pinto Mexicano 80 mostraron una reducción específica del pH, sin mostrar cambios morfológicos en la raíz (Figura 3). Estas variedades podrían ser capaces de absorber Fe en suelos calcáreos, en los cuales el Fe se encuentra en forma

férrica no disponible para la planta (Loué, 1988), al acidificar el medio el Fe se reduce y pasa a la forma ferrosa que es disponible para la planta, además de que se podrían activar las reductasas en el plasmalema de las células de la epidermis de la raíz (Olsen y Brown, 1980).

Muchas investigaciones realizadas en diversos países de Europa y en los Estados Unidos de América, demostraron que el bióxido de carbono es uno de los productos emitidos por la planta que pueden disminuir ligeramente el pH de la rizósfera (Moreno *et al.*, 1987). Sin embargo, el decremento del pH debido al CO<sub>2</sub> es poco notable como se demuestra al tener poca variación en la rizósfera de las variedades Durango 222 y Lagunero 87 (Figura 4), que no mostraron capacidad para disminuir el pH del medio, como lo mostraron las otras variedades. Actualmente se sabe que el pH del medio cercano a las raíces de las plantas no está determinado por una saturación de CO<sub>2</sub> sino por otros factores (Nye, 1981). La variedad susceptible a clorosis férrica (Canario 101), disminuyó el pH hasta 4.5. Esto indica que tiene cierta capacidad de acidificar la rizósfera, pero no con la amplitud que tienen las variedades Fe eficientes como lo son el AN 22 y el Pinto Méx. 80.

Un factor importante que se tiene que considerar en la siembra en condiciones de campo, es la potencialidad que muestran algunas variedades de incrementar rápidamente el área de exploración de la raíz, que les permite por intercepción radical, entrar en contacto con el Fe y pasarlo de su forma férrica (oxidada) a una forma ferrosa (reducida) disponible para la absorción de la raíz. Esta capacidad la podría tener la variedad Durango 222 que se clasifica como Fe eficiente, además podría tener la capacidad de modificar la actividad del Fe dentro de la planta al modificar el pH interno, ya que esta es una de las posibles causas de la clorosis férrica (Romera y Díaz, 1991). El Fe se puede precipitar en el apoplasto como consecuencia de la alcalinización producida por efecto del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> o por la absorción o reducción de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Mengel y Geurtzen, 1988). Otra posibilidad, que no excluye a la anterior, es que la reducción del Fe<sup>+3</sup> en la hoja se vea afectada negativamente por el pH elevado.

Es importante resaltar que la metodología utilizada para detectar los cambios del pH de la rizósfera es adecuada para discriminar entre variedades de frijol en cuanto a esta característica. La técnica se puede utilizar para identificar progenitores y seleccionar plántulas segregantes Fe-eficientes en programas de mejoramiento genético para variedades adaptadas a suelos alcalinos.

Fig. 3. Las variedades AN 22 (a) y el Pinto Mexicano 80 (b) acidifican el medio hasta un pH de 3. El color púrpura indica un pH alcalino (negro en las figuras) y el color amarillo indica un pH ácido (blanco en las figuras). Se puede observar que la variedad AN 22 acidifica el medio con mayor intensidad y mayor proporción que el Pinto Méx. 80.



Fig. 4. Las variedades Lagunero 87 y el Durango 222 no acidifican el medio nutritivo. El color púrpura indica un pH alcalino (negro en la figura).

#### **4.1.3 Experimento III. Efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos**

Las plantas Fe-eficientes son capaces de absorber el hierro en condiciones de oxidación, por lo tanto, algunos cultivares podrían no afectar su rendimiento en condiciones de oxidación, causada por déficit de agua en el suelo. Por lo anterior la presente investigación tuvo como objetivo clasificar el grado de clorosis férrica de diferentes materiales de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos con diferentes condiciones de humedad.

Se realizó el análisis de varianza con la finalidad de observar las diferencias entre los suelos, abatimientos de humedad y cultivares, así como las interacciones entre estos tratamientos. Para la comparación de medias de los tratamientos con diferencia significativa se utilizó la prueba de Tukey.

#### 4.1.3.1 Tipos de suelo

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

Como se puede observar en el cuadro A2, entre los suelos utilizados el análisis de varianza no encontró diferencias significativas para grado de clorosis a los 35, 45 y 55 días después de la emergencia, altura de planta, días a floración y materia seca; pero para rendimiento de grano por planta si hubo diferencia significativa.

En el cuadro 17 se presentan los promedios de rendimiento de grano y otros factores fisiológicos para los diferentes tipos de suelos.

Clorosis. No se encontró diferencia estadística entre los tipos de suelos utilizados.

Altura. Aunque no se encontró diferencia estadística se observó que en el suelo con textura franco arcilloso con 24.4 me de  $\text{HCO}_3$  100  $\text{g}^{-1}$ , se encontró mayor altura (121.52 cm) que el suelo de textura franco arcillo limoso (77.45 cm) con 17.5 me de  $\text{HCO}_3$  100  $\text{g}^{-1}$ .

Floración. Aunque no se encontró diferencia estadística se observó que en el suelo de textura franco arcilloso floreció dos días antes que el suelo franco arcillo limoso.

Cuadro 17. Comparación de medias para grado de clorosis, floración, altura (cm), producción de materia seca (g planta<sup>-1</sup>) y rendimiento de grano del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.

| Tratamiento                          | Clorosis 35 días | Clorosis 45 días | Clorosis 55 días | Altura de planta cm | Floración días | Materia seca g planta <sup>-1</sup> | Rnto grano g planta <sup>-1</sup> |
|--------------------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Pinto Mexicano 80                 | 1.38 b c         | 1.40 b c d       | 1.05 b           | 69.8 e              | 46.8 bc        | 11.55 bc                            | 32.4 a                            |
| 2. Pinto Villa                       | 1.47 b c         | 1.49 b           | 1.05 b           | 106.6 bcd           | 42.9 de        | 15.58 b                             | 31.6 a                            |
| 3. Navidad 1165                      | 1.41 b c         | 1.45 b c         | 1.00 b           | 120.4 bc            | 40.9 ef        | 13.90 b                             | 32.2 a                            |
| 4. Durango 222                       | 1.29 b c         | 1.31 c d         | 1.00 b           | 125.9 b             | 48.8 ab        | 22.03 a                             | 31.8 a                            |
| 5. AN-22                             | 1.19 c           | 1.27 d           | 1.00 b           | 169.4 a             | 45.1 cd        | 16.00 b                             | 35.8 a                            |
| 6. Canario 101                       | 1.87 a           | 1.83 a           | 1.45 a           | 30.4 f              | 40.5 ef        | 6.95 c                              | 17.6 c                            |
| 7. FE 30 RB                          | 1.36 b c         | 1.31 c d         | 1.05 b           | 77.9 de             | 50.6 a         | 13.46 b                             | 32.6 a                            |
| 8. Pinto 114                         | 1.50 b           | 1.45 b c         | 1.05 b           | 95.6 cde            | 39.5 f         | 15.25 b                             | 26.6 b                            |
| Suelo 1. (Tex. Franco Arcilloso)     | 1.42 a           | 1.45 a           | 1.06 a           | 121.52 a            | 43.25 a        | 18.53 a                             | 31.17 a                           |
| Suelo2. (Tex. Franco Arcillo Limoso) | 1.44 a           | 1.43 a           | 1.10 a           | 77.45 a             | 45.50 a        | 10.15 a                             | 28.5 b                            |
| Abatimiento de humedad (70%)         | 1.38 a           | 1.39 b           | 1.07 a           | 079.60 b            | 44.09 a        | 09.90 a                             | 19.17 b                           |
| Abatimiento de humedad (20%)         | 1.48 a           | 1.48 a           | 1.09 a           | 119.38 a            | 44.66 a        | 18.78 a                             | 40.50 a                           |

\*Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

Materia seca. Aunque no se encontró diferencia estadística se observó que el suelo de textura franco arcilloso obtuvo mayor producción de biomasa ( $18.53 \text{ g planta}^{-1}$ ) al momento de floración, que en el suelo franco arcillo limoso con  $10.15 \text{ g planta}^{-1}$ .

Rendimiento de grano por planta. La prueba de Tukey muestra que en el suelo con textura franco arcilloso con  $24.4 \text{ me de HCO}_3 100 \text{ g}^{-1}$ , se produjo mayor rendimiento de grano ( $31.17 \text{ g planta}^{-1}$ ) que el suelo de textura franco arcillo limoso con  $17.5 \text{ me de HCO}_3 100 \text{ g}^{-1}$  ( $28.5 \text{ g planta}^{-1}$ ).

Componentes del rendimiento.

Como se puede observar en el cuadro A3 entre los suelos utilizados, el análisis de varianza no encontró diferencia significativa para los componentes del rendimiento (vainas por planta, tamaño de vaina, número de granos por vaina y peso de 100 semillas); por lo que se concluye que el tipo de suelo no afectó significativamente los componentes del rendimiento. Aunque en el suelo franco arcilloso se observa una tendencia a tener mayor número de vainas por planta, tamaño de vaina y número de granos por vaina, que en suelo franco arcillo limoso (Cuadro 18).

Contenido foliar de nutrimentos.

Para el contenido de nutrimentos al momento de floración considerando el factor de variación suelo, el análisis de varianza encontró diferencia altamente significativa solo para potasio "K", para N, P, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn diferencia no significativa (Cuadro A4); en las proporciones Fe:nutrimentos se encontró diferencia significativa para la relación del hierro con los nutrimentos Ca y Mn (Cuadro A5).

En general se presentó mayor contenido foliar de nutrimentos en las plantas cultivadas en el suelo de textura franco arcilloso, en comparación al de textura franco arcillo limoso, aunque estadísticamente no se encontró diferencia significativa (Cuadro

19). Para potasio la planta presentó mayor contenido el suelo franco arcilloso con 4.03% en comparación con el suelo franco arcillo limoso con 3.5% en base a materia seca.

Cuadro 18. Comparación de medias para los componentes del rendimiento del experimento “efecto de la humedad del suelo en cultivares de frijol Fe-eficientes y Fe-ineficientes en suelos calcáreos”.

| Tratamiento                         | Vainas por planta | Tamaño de vaina, cm | No. de granos por vaina | Peso de 100 semillas, g |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1. Pinto Mexicano 80                | 21.3 a b          | 11.01 a             | 5.75 a                  | 33.6 cd                 |
| 2. Pinto Villa                      | 18.8 a b          | 8.93 cd             | 4.75 bcd                | 40.3 b                  |
| 3. Navidad 1165                     | 24.5 a            | 9.50 bc             | 5.00 bcd                | 39.2 bc                 |
| 4. Durango 222                      | 16.5 a b          | 9.68 b              | 4.63 cd                 | 59.5 a                  |
| 5. AN-22                            | 22.1 a b          | 8.49 d              | 4.63 cd                 | 39.0 bc                 |
| 6. Canario 101                      | 11.8 b            | 10.89 a             | 4.38 d                  | 43.5 b                  |
| 7. FE 30 RB                         | 26.8 a            | 9.16 bc             | 5.13 abc                | 27.6 d                  |
| 8. Pinto 114                        | 17.3 a b          | 10.83 a             | 5.38 ab                 | 42.5 b                  |
| Suelo 1. Tex. Franco Arcilloso      | 20.7 a            | 10.0 a              | 5.06 a                  | 40.48 a                 |
| Suelo 2. Tex. Franco Arcillo Limoso | 19.0 a            | 9.6 a               | 4.84 a                  | 40.74 a                 |
| Abatimiento de humedad (70%)        | 15.1 a            | 9.3 b               | 4.7 b                   | 39.46 a                 |
| Abatimiento de humedad (20%)        | 24.7 a            | 10.3 a              | 5.2 a                   | 41.77 a                 |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

En cuanto a proporción del hierro con Ca y Mn, el suelo franco arcilloso presentó mayor relación que el suelo franco arcillo limoso (Cuadro 20); debido a que el contenido en hojas de estos elementos al igual que el Zn fue mayor que las plantas cultivadas en el suelo franco arcilloso.

Índice de Desviación al Porcentaje Óptimo (DPO). Con la finalidad de conocer cual elemento nutritivo causó mayor desbalance nutricional se determinó el índice de desviación al porcentaje óptimo. Considerando los tipos de suelo en general los índices

DPO (Cuadro 21) manifiestan que el orden de requerimientos para los nutrientes con deficiencia es  $Mn > Zn > P > N > Fe$ , siendo el Mn, Zn y P los nutrientes con mayor desviación al porcentaje óptimo. Y, para los nutrientes que se encuentran en mayor cantidad el orden de requerimientos es  $K > Ca > Mg > Cu$ .

#### 4.1.3.2 Niveles de humedad en el suelo

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

Como se puede observar en el cuadro A2, entre los niveles de humedad del suelo utilizados el análisis de varianza no encontró diferencias significativas para grado de clorosis a los 35 y 55 días después de emergencia, días a floración y materia seca; pero para clorosis a los 45 días después de emergencia y rendimiento de grano por planta si hubo diferencia significativa; para altura de planta se encontró diferencia altamente significativa.

En cuanto a la interacción suelo x humedad se encontró diferencia altamente significativa para grado de clorosis a los 45 días después de emergencia y para altura de planta.

Para la comparación de medias de los tratamientos con diferencia significativa se utilizó la prueba de Tukey. Los promedios y los grupos formados se presentan en el Cuadro 17.

Clorosis. En los primeros 45 días después de emergencia, se mostró una mayor clorosis férrica con un abatimiento del 20% de humedad aprovechable y a partir de los 55 días la clorosis férrica disminuyó considerablemente no encontrándose diferencia entre los tratamientos utilizados; no se disminuyó la clorosis férrica al 20% de humedad disponible, debido probablemente a que la humedad no es suficiente para mantener las condiciones de reducción y así incrementar el hierro disponible ( hierro reducido) para la planta.

Cuadro 19. Comparación de medias para contenido nutrimental del experimento efecto de la humedad en la clorosis férrica del frijol.

| Tratamiento                       | N<br>%   | P<br>%    | K<br>% | Ca<br>% | Mg<br>%  | Fe<br>ppm | Cu<br>ppm | Zn<br>ppm | Mn<br>ppm |
|-----------------------------------|----------|-----------|--------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1. Pinto Mexicano 80              | 4.89 abc | 0.445 abc | 3.75 a | 2.48 ab | 0.821 ab | 209.5 a   | 28.8 a    | 59.2 ab   | 90.2 a bc |
| 2. Pinto Villa                    | 4.58 c   | 0.413 c   | 3.90 a | 2.58 a  | 0.888 a  | 188.3 ab  | 26.8 ab   | 57.0 ab   | 95.3 a b  |
| 3. Navidad 1165                   | 4.14 d   | 0.414 bc  | 3.74 a | 2.40 b  | 0.859 ab | 169.0 bc  | 24.8 b    | 57.0 ab   | 91.9 a bc |
| 4. Durango 222                    | 5.16 a   | 0.493 a   | 3.77 a | 2.50 ab | 0.839 ab | 149.6 c   | 25.9 ab   | 56.7 b    | 101.7 a   |
| 5. AN-22                          | 5.20 a   | 0.451 abc | 3.62 a | 2.18 c  | 0.725 c  | 156.6 c   | 28.1 ab   | 66.4 a    | 82.0 bc   |
| 6. Canario 101                    | 5.09 ab  | 0.488 ab  | 3.83 a | 2.44 ab | 0.846 ab | 201.6 a   | 25.4 ab   | 62.0 ab   | 87.3 bc   |
| 7. FE 30 RB                       | 4.73 bc  | 0.471 abc | 3.85 a | 2.46 ab | 0.856 ab | 170.5 bc  | 26.6 ab   | 62.9 ab   | 84.4 bc   |
| 8. Pinto 114                      | 5.08 ab  | 0.413 c   | 3.65 a | 2.49 ab | 0.778 bc | 159.0 c   | 26.1 ab   | 60.1 ab   | 79.5 c    |
| S1. Tex. Franco Arcilloso         | 4.93 a   | 0.509 a   | 4.03 a | 2.40 a  | 0.916 a  | 178.8 a   | 27.3 a    | 58.9 a    | 81.1 a    |
| S2. Tex. Franco Arcillo<br>Limoso | 4.78 a   | 0.387 a   | 3.50 b | 2.48 a  | 0.737 a  | 172.3 a   | 25.8 a    | 61.4 a    | 96.9 a    |
| Abatimiento 70% de humedad        | 4.93 a   | 0.453 a   | 3.69 a | 2.49 a  | 0.850 a  | 174.0 a   | 27.6 a    | 59.6 a    | 87.3 a    |
| Abatimiento 20% de humedad        | 4.78 a   | 0.443 a   | 3.84 a | 2.39 a  | 0.803 a  | 177.1 a   | 25.5 a    | 60.7 a    | 90.7 a    |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

Cuadro 20. Comparación de medias para relación del contenido foliar del Fe con otros nutrimentos del experimento diferentes condiciones de humedad en la clorosis férrica del frijol.

| Tratamiento                    | Fe:N    | Fe:P      | Fe:K     | Fe:Ca   | Fe:Mg    | Fe:Cu   | Fe:Zn   | Fe:Mn   |
|--------------------------------|---------|-----------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 1. Pinto Mexicano 80           | 42.8 a  | 470.8 a   | 55.9 a   | 84.5 a  | 255.2 a  | 7.3 ab  | 3.5 a   | 2.3 a   |
| 2. Pinto Villa                 | 41.1 ab | 455.9 a   | 48.3 abc | 73.0 bc | 212.0 bc | 7.0 abc | 3.3 a   | 2.0 abc |
| 3. Navidad 1165                | 40.8 ab | 408.2 ab  | 45.2 bcd | 70.4 cd | 196.7 bc | 6.8 abc | 3.0 abc | 1.8 bc  |
| 4. Durango 222                 | 29.0 d  | 303.4 d   | 39.7 d   | 59.8 d  | 178.3 c  | 5.8 c   | 2.6 bc  | 1.5 c   |
| 5. AN-22                       | 30.1 d  | 347.2 cd  | 43.3 cd  | 71.8 bc | 216.0 bc | 5.6 c   | 2.4 c   | 1.9 abc |
| 6. Canario 101                 | 39.6 ab | 413.1 abc | 52.6 ab  | 82.6 ab | 238.3 ab | 7.9 a   | 3.3 ab  | 2.3 ab  |
| 7. FE 30 RB                    | 36.0 bc | 362.0 bcd | 44.3 cd  | 69.3 cd | 199.2 bc | 6.4 abc | 2.7 bc  | 2.0 abc |
| 8. Pinto 114                   | 31.3 cd | 385.0 bcd | 43.6 cd  | 63.9 cd | 204.4 bc | 6.1 bc  | 2.6 bc  | 2.0 abc |
| S1. Tex. Franco Arcilloso      | 36.3 a  | 351.3 a   | 44.4 a   | 74.5 a  | 195.2 a  | 6.5 a   | 3.0 a   | 2.2 a   |
| S2. Tex. Franco Arcillo Limoso | 36.0 a  | 445.2 a   | 49.2 a   | 69.5 b  | 233.8 a  | 6.7 a   | 2.8 a   | 1.8 b   |
| Abatimiento 70% de humedad     | 35.3 a  | 384.1 a   | 47.2 a   | 69.9 a  | 204.7 a  | 6.3 a   | 2.9 a   | 2.0 b   |
| Abatimiento 20% de humedad     | 37.1 a  | 399.8 a   | 46.1 b   | 74.1 a  | 220.5 a  | 6.9 a   | 2.9 a   | 2.0 a   |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)



Altura de planta. Los diferentes niveles de humedad afectaron el crecimiento de los cultivos, obteniendo mayor altura el abatimiento de un 20% de la humedad aprovechable (119.38 cm) que el abatimiento del 70% (79.6 cm).

En ambos suelos la altura de planta fue mayor al permitir un abatimiento de humedad aprovechable del 20%; alcanzando mayor altura con el tratamiento de 20% de humedad aprovechable con el suelo franco arcilloso (153.6 cm).

Días a floración. Los diferentes niveles de humedad del suelo no influyeron en los días a floración.

Materia seca. En cuanto a los diferentes niveles de humedad con un abatimiento del 20% se incrementó el doble la producción de biomasa ( $18.78 \text{ g planta}^{-1}$ ) en comparación con el 70% de abatimiento de la humedad ( $9.9 \text{ g planta}^{-1}$ ), aunque no el análisis estadístico no encontró diferencia significativa.

Rendimiento de grano por planta. El abatimiento del 70% de la humedad aprovechable redujo más de la mitad el rendimiento por planta que el abatimiento del 20% de la humedad con  $19.17$  y  $40.5 \text{ g planta}^{-1}$ , respectivamente.

Componentes del rendimiento.

Para los componentes del rendimiento se encontró diferencia significativa para tamaño de vaina y número de granos por vaina; en la interacción suelo x humedad se encontró diferencia significativa solo para tamaño de vaina (Cuadro A3).

Para la comparación de medias de los tratamientos con diferencia significativa se utilizó la prueba de Tukey. Los promedios y los grupos formados se presentan en el Cuadro 18.

En general se obtuvieron mejores resultados al permitir un abatimiento de la humedad disponible del 20% (Cuadro 18) con promedios de 24.7 vainas por planta, 10.3 cm de tamaño de vaina y 5.2 granos por vaina; repercutiendo en una mayor producción de semilla por planta con 40.50 g; para un abatimiento de humedad del 70% se obtuvo un rendimiento de 19.17 g planta<sup>-1</sup>.

Contenido foliar de nutrimentos.

Para el contenido de nutrimentos en las plantas con diferente contenido de humedad en el suelo (Cuadro A4) el análisis de varianza no encontró diferencia significativa para ninguno de los nutrimentos analizados (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn). Para las proporciones Fe:nutrimentos se encontró diferencia significativa para las relaciones del hierro con K y altamente significativa para la relación con el Mn (Cuadro A5). En la interacción suelo x humedad no se encontró diferencias significativas en el contenido de nutrimentos; solo se encontró diferencia significativa en las relaciones con K y Zn y altamente significativa con Mn.

Con un 20% de abatimiento de la humedad disponible se obtuvieron menores proporciones de Fe:nutrimentos en K y Mn, además del Zn; para los demás nutrimentos las proporciones fueron mayores.

El abatimiento de la humedad disponible en el suelo del 20% no permitió una mejor absorción de Fe en comparación de la pérdida del 70% de la humedad (no mostró diferencia estadística) como se esperaba, probablemente debido a que las condiciones reductoras fueron temporales, por el buen drenaje de los bancales y se requiere de condiciones reductoras (encharcamiento) para aumentar los niveles de Mn<sup>+2</sup> y Fe<sup>+2</sup>. Lindsay (1984) menciona que en condiciones reductoras (encharcamientos) se ocasiona una reducción química de los metales pesados, entre ellos el Fe<sup>+3</sup>, pero al mantener al

suelo a 20% de humedad aprovechable permite una buena aireación del suelo por lo que el  $\text{Fe}^{+3}$  continua oxidado, presentándose la clorosis férrica.

Índice de Desviación al Porcentaje Óptimo (DPO). Para los niveles de humedad, al igual que los suelos analizados, los índices DPO (Cuadro 21) en general manifiestan que el orden de requerimientos para los nutrimentos con deficiencia es  $\text{Mn} > \text{Zn} > \text{P} > \text{N} > \text{Fe}$ , siendo el Mn y el Zn los nutrimentos con mayor desviación al porcentaje óptimo. Para los nutrimentos que se encuentran en exceso el orden de requerimientos es  $\text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Cu}$ .

#### 4.1.3.3 Cultivares

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

Para cultivares el análisis de varianza encontró diferencia altamente significativa para clorosis a los 35, 45 y 55 días después de emergencia, altura de planta, días a floración, materia seca y rendimiento de grano por planta (Cuadro A2).

En la interacción suelo x cultivar se encontró diferencia significativa para clorosis a los 45 días después de emergencia, altura de planta, días a floración y materia seca por planta; para rendimiento de grano por planta se encontró diferencia altamente significativa. En la interacción humedad x cultivar se encontró diferencia altamente significativa en rendimiento de grano planta. En la interacción suelo x humedad x cultivar, se encontró diferencia altamente significativa para clorosis a los 35 días después de emergencia (Cuadro A2).

Para la comparación de medias de los tratamientos con diferencia significativa se utilizó la prueba de Tukey. Los promedios y los grupos formados se presentan en el Cuadro 17.

Clorosis. Como se observa en el Cuadro 17 el cultivar con mayor grado de clorosis es el Canario 101, genotipo utilizado en este trabajo como testigo susceptible, se encontró que es el cultivar con mayor clorosis independientemente del tipo de suelo utilizado. Los cultivares con menor grado de clorosis a los 45 días fueron el AN-22, Durango 222, FE 30 RB y el Pinto Mexicano 80. En general a los 55 días a partir de la emergencia los síntomas de clorosis férrica desaparecieron en los cultivares, solo mostrando una ligera clorosis férrica el cultivar Canario 101.

En la interacción suelo x cultivar resalta que en el suelo con textura franco arcilloso con 17.5 me de  $\text{HCO}_3$  100  $\text{g}^{-1}$ , los cultivares con menor grado de clorosis a los 45 días después de emergencia fueron el AN 22 y el Pinto Mexicano 80; en el suelo con textura franco arcillo limoso con 24.4 me de  $\text{HCO}_3$  100  $\text{g}^{-1}$ , los genotipos con menor grado de clorosis fueron el Durango 222, FE 30 RB y el AN 22.

Altura de planta. De acuerdo a la prueba de Tukey, el cultivar de menor altura fue el Canario 101, ya que su hábito de crecimiento es determinado a diferencia de los otros cultivares que presentaron hábitos de crecimiento indeterminado (Cuadro 17) destacándose el AN 22 como el de mayor altura (169.4 cm).

En el suelo franco arcilloso los cultivares con mayor altura de planta, fueron Navidad 1165 (152.6 cm) y el AN-22 (181.1 cm); en el suelo franco arcillo limoso, los cultivares con mayor altura, fueron el Durango 222 (105.5 cm) y el AN-22 (157.6 cm); en ambos suelos el canario 101 fue el de menor altura.

Días a floración. La prueba de tukey muestra que los cultivares más precoces fueron Pinto 114, Canario 101 y el Navidad 1165 floreciendo a los 40 días aproximadamente y los más tardíos los cultivares FE 30 RB y Durango 222 con 50 días aproximadamente; el comportamiento fue similar en ambos tipos de suelos.

Materia seca. Como se observa en el Cuadro 17 el cultivar con mayor producción de materia seca por planta, al momento de floración, fue el Durango 222 (22.03 g planta<sup>-1</sup>), destacándose también los cultivares AN 22 (16.0 g planta<sup>-1</sup>), Pinto Villa (15.58 g planta<sup>-1</sup>) y el Pinto 114 (15.25 g planta<sup>-1</sup>); los de menor producción de biomasa fueron el Canario 101 (6.95 g planta<sup>-1</sup>) y el Pinto Mexicano 80 con 11.55 g planta<sup>-1</sup>.

Analizando la interacción suelo x genotipos, se encontró que en el suelo de textura franco arcillo limoso los genotipos con mayor producción de materia seca fueron el Durango 222, AN 22 y el FE-30-RB; en el suelo Franco Arcilloso fueron el Durango 222, Pinto Villa y el Pinto 114. En ambos suelos el Canario 101 se encuentra dentro del grupo de menor producción de materia seca.

Rendimiento de grano por planta. En cuanto a rendimiento de grano por planta los materiales de mayor rendimiento fueron el AN-22 (35.8 g planta<sup>-1</sup>), FE-30-RB (32.6 g planta<sup>-1</sup>) y Pinto Mexicano 80 (32.4 g planta<sup>-1</sup>), el genotipo de menor rendimiento fue el Canario 101 (17.6 g planta<sup>-1</sup>) (Cuadro 17).

En el suelo franco arcilloso, los cultivares con mayor rendimiento de grano por planta, fueron el AN-22, FE30RB, Navidad 1165 y el Pinto Villa. Y, los cultivares con menor rendimiento de grano por planta, fueron el Canario 101 (10 g) y el pinto 114 (12.7 g). En el suelo franco arcillo limoso, los cultivares con mayor rendimiento de grano fueron el AN-22 con 40.3 g además del Pinto Mexicano 80 (36.2 g), FE30RB (34.2g), Navidad 1165 (33.8 g); los cultivares de menor rendimiento de grano por planta, fueron el Canario 101 (15.4 g) y el Pinto 114 (27.8 g).

Componentes del rendimiento.

Para cultivares el análisis de varianza encontró diferencia altamente significativa para todos los componentes del rendimiento (vainas por planta, tamaño de vaina, número de granos por vaina y peso de 100 semillas) (Cuadro A3).

En cuanto a la interacción suelo x cultivar se encontró diferencia significativa para tamaño de vaina y número de granos por vaina. Y diferencia significativa en la interacción suelo x humedad x cultivar, solo para número de granos por vaina.

En cuanto a los diferentes cultivares utilizados destaca el Canario 101 por su mayor tamaño de vaina (10.89 cm) pero el rendimiento se reduce por su poca producción de vainas por planta (11.8) y granos por vaina (4.38). Sobresalieron los cultivares FE 30 RB, Navidad 1165 y el AN 22 por su tendencia a tener mayor número de vainas por planta; Pinto Mexicano 80 y el pinto 114 por su tamaño de vaina y número de granos por vaina; y el Durango 222 por su mayor peso de 100 semillas (59.5 g).

En ambos suelos los cultivares con mayor tamaño de vaina fueron el Pinto mexicano 80, Canario 101 y el pinto 114.

Contenido foliar de nutrimentos.

Para el contenido de nutrimentos al momento de floración se encontró diferencia altamente significativa para N, P, Ca, Mg, Fe y Mn; diferencia significativa para Cu y Zn; y no significativa para K (Cuadro A4); para todas las proporciones se encontró diferencia altamente significativa (Cuadro A5).

En la interacción suelo x cultivar se encontró diferencia altamente significativa para P y Fe; diferencia significativa para N, Cu y Mn. En la interacción humedad x cultivar se encontró diferencia altamente significativa para N, Ca, Fe y Zn; diferencia significativa para Cu y Mn. En la interacción suelo x humedad x cultivar, se encontró diferencia altamente significativa para Ca, Mg, Fe, Zn y Mn; y diferencia significativa para P y Cu.

Para N los valores en los cultivares variaron de 4.14% para el cv Navidad 1165 hasta 5.20% para el cv AN-22; considerándose los valores dentro del rango adecuado. Para P los valores en los cultivares variaron de 0.413% para los cultivares Pinto Villa y Pinto 114 hasta 0.493% para el cv Durango 222; considerándose los valores dentro del rango adecuado. Para K los valores en los cultivares variaron de 3.62% para el cv AN-22 hasta 3.90% para el cv Pinto Villa; considerándose los valores dentro del rango adecuado. Para Ca los valores en los cultivares variaron de 2.18% para el cv AN-22 hasta 2.58% para el cv Pinto Villa; considerándose los valores dentro del rango adecuado. Para Mg los valores en los cultivares variaron de 0.725% para el cv AN-22 hasta 0.888% para el cv Pinto Villa; considerándose los valores dentro del rango adecuado. Para Fe los valores en los cultivares variaron de 149.6 ppm para el cv Durango 222 hasta 209.5 ppm para el cv Pinto Mexicano 80; considerándose los valores dentro del rango adecuado. Para Cu los valores en los cultivares variaron de 24.8 ppm para el cv Navidad 1165 hasta 28.8 ppm para el cv Pinto Mexicano 80; considerándose los valores dentro del rango adecuado ya que Benton (1983) indica que concentraciones de Cu entre 20 y 100 ppm son suficientes para la planta. Para Zn los valores en los cultivares variaron de 56.7 ppm para el cv Durango 222 hasta 66.4 ppm para el cv AN-22; considerándose los valores dentro del rango adecuado. Para Mn los valores en los cultivares variaron de 79.5 ppm para el cv Pinto 114 hasta 101.7 ppm para el cv Durango 222; considerándose los valores dentro del rango adecuado.

Como el estudio se enfoca a clorosis férrica, se discute el contenido foliar de Fe y sus proporciones con los otros nutrimentos.

En cuanto al contenido foliar de Fe los cultivares con mayor contenido fueron el Pinto Mexicano 80, el Canario 101 y el Pinto Villa, con 209.5, 201.6 y 159 ppm respectivamente; y los cultivares con menor contenido fueron el Durango 222, el AN-22 y el Pinto 114 con 149.6, 156.6 y 159 ppm respectivamente (Cuadro 19). Destaca que los cultivares susceptibles a clorosis férrica como el Pinto 114 y el Canario 101 tienden a manifestar síntomas de clorosis férrica, aun con contenidos adecuados de Fe en las hojas,

debido probablemente a que la fisiología de la planta no le permite metabolizar dicho elemento, ya que la reducción del  $\text{Fe}^{+3}$  en la hoja es afectada negativamente por el pH elevado, siendo una de las posibles causas de la clorosis férrica (Romera y Díaz, 1991).

En los suelos estudiados los cultivares de mayor contenido de Fe foliar fueron el Pinto Mexicano 80, Canario 101 y el Pinto Villa y el cultivar de menor contenido de Fe foliar fue el Durango 222.

Proporción Fe con respecto a otros nutrimentos. En el Cuadro 20 se puede observar que en general los cultivares de mayor proporción Fe:nutrimentos fueron el Pinto Mexicano 80, Canario 101 y el Pinto Villa; los cultivares de menor proporción Fe:nutrimentos fueron el Durango 222, AN-22 y el Pinto 114.

Índice de Desviación al Porcentaje Óptimo (DPO). Los cultivares en estudio contienen niveles por arriba del porcentaje óptimo de K, Ca, Mg y Cu; en general los nutrimentos con mayor requerimiento de acuerdo al siguiente orden son:  $\text{Mn} > \text{Zn} > \text{P} > \text{N} > \text{Fe}$ .

Los cultivares con contenido de hierro por arriba del porcentaje óptimo (175 ppm) fueron el Pinto Villa (188.3 ppm), Canario101 (201.6 ppm) y el Pinto Mexicano 80 (209.5 ppm) y los cultivares con menor contenido de hierro fueron el Durango 222 (149.6 ppm), AN-22 (156.6 ppm) y el Pinto 114 (159 ppm).

El contenido de Fe presentó correlación significativa con clorosis a los 35 días (0.267\*) y una correlación altamente significativa con clorosis a los 45 días (0.380\*\*), lo que indica que las plantas que manifiestan clorosis tienden a acumular el hierro en las hojas al no poder metabolizarlo.

Es importante destacar que a los 35 días el contenido foliar de Zn presentó una correlación significativa con clorosis (-0.290\*) lo que indica que a menor contenido de



Zn la clorosis es mayor. De acuerdo a lo anterior se puede pensar que la clorosis manifestada por los cultivares de frijol sería de Zn, pero la deficiencia de Zn se manifiesta por sintomatología con detención del crecimiento debido al acortamiento de entrenudos y una drástica disminución en el tamaño de las hojas jóvenes, que generalmente se retuercen y adoptan un aspecto fusiforme y se puede presentar también un amarillamiento entre nervaduras (Sánchez y Miranda, 2003), sintomatología que no presentaron las plantas con clorosis. Pero no se descarta que la clorosis mostrada en los cultivares, sea debido a el Fe y el Zn, siendo el Zn una deficiencia fisiológica.

Además el contenido de Fe foliar presentó correlación altamente significativa con altura de planta (- 0.33\*\*) y biomasa (- 0.38\*\*), lo que indica que las plantas que manifiestan clorosis tienden a acumular el hierro en las hojas al no poder metabolizarlo, no hay síntesis de clorofila, repercutiendo en una menor altura de planta y menor producción de biomasa. El contenido de Fe foliar no correlacionó con los componentes del rendimiento y con el peso de grano por planta. El rendimiento presentó una correlación significativa con días a floración (0.289\*) y altamente significativa con contenido de Ca foliar (0.351\*\*), altura de planta (0.495\*\*), número de granos por vaina (0.395\*\*), número de vainas por planta (0.671\*\*) y biomasa (0.451\*\*), cabe destacar que aunque no presentó correlación con clorosis esta tiene una relación negativa, es decir a mayor clorosis menor rendimiento.

Cuadro 21. Contenido nutrimental en % para macronutrientes y ppm para micronutrientes en base a materia seca e índices DOP para los tratamientos del experimento efecto de la humedad en la clorosis férrica.

| Tratamiento                             | N                   | P                    | K                  | Ca                | Mg                  | Fe                   | Cu                 | Zn                  | Mn                   | Σ IDOP | Requerimientos              |
|---|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------|-----------------------------|
| 1. PINTO MEX. 80<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL | 4.89<br>-11.09<br>D | 0.445<br>-19.09<br>D | 3.75<br>19.81<br>E | 2.48<br>24<br>E   | 0.821<br>26.31<br>E | 209.5<br>19.71<br>E  | 28.8<br>55.68<br>E | 59.2<br>-46.18<br>D | 90.2<br>-48.46<br>D  | 270.33 | Mn>Zn>P>N><br>Fe>K>Ca>Mg>Cu |
| 2. PINTO VILLA<br>ÍNDICE DOP*<br>NIVEL  | 4.58<br>-16.73<br>D | 0.413<br>-24.9<br>D  | 3.90<br>24.6<br>E  | 2.58<br>29<br>E   | 0.888<br>36.62<br>E | 188.3<br>7.6<br>E    | 26.8<br>44.86<br>E | 57.0<br>-48.18<br>D | 95.3<br>-45.54<br>D  | 278.03 | Zn>Mn>P>N><br>Fe>K>Ca>Mg>Cu |
| 3. NAV. 1165<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL     | 4.14<br>-24.73<br>D | 0.414<br>-24.73<br>D | 3.74<br>19.49<br>E | 2.40<br>20<br>E   | 0.859<br>32.15<br>E | 169.0<br>-3.43<br>D  | 24.8<br>34.05<br>E | 57.0<br>-48.18<br>D | 91.9<br>-47.49<br>D  | 254.25 | Zn>Mn>P=N>Fe><br>K>Ca>Mg>Cu |
| 4. DURANGO 222<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL   | 5.16<br>-6.18<br>D  | 0.493<br>-10.36<br>D | 3.77<br>20.45<br>E | 2.50<br>25<br>E   | 0.839<br>29.08<br>E | 149.6<br>-14.51<br>D | 25.9<br>40.0<br>E  | 56.7<br>-48.45<br>D | 101.7<br>-41.89<br>D | 235.92 | Zn>Mn>Fe>P>N><br>K>Ca>Mg>Cu |
| 5. AN-22<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL         | 5.20<br>-5.45<br>D  | 0.451<br>-18.0<br>D  | 3.62<br>15.65<br>E | 2.18<br>9<br>E    | 0.725<br>11.54<br>E | 156.6<br>-10.51<br>D | 28.1<br>51.89<br>E | 66.4<br>-39.64<br>D | 82.0<br>-53.14<br>D  | 214.83 | Mn>Zn>P>Fe>N><br>Ca>Mg>K>Cu |
| 6. CANARIO 101<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL   | 5.09<br>-7.45<br>D  | 0.488<br>-11.3<br>D  | 3.83<br>22.36<br>E | 2.44<br>22<br>E   | 0.846<br>30.15<br>E | 201.6<br>15.2<br>E   | 25.4<br>37.30<br>E | 62.0<br>-43.64<br>D | 87.3<br>-50.11<br>D  | 239.49 | Mn>Zn>P>N><br>Fe>Ca>K>Mg>Cu |
| 7. FE 30 RB<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL      | 4.73<br>-14.00<br>D | 0.471<br>-14.36<br>D | 3.85<br>23.00<br>E | 2.46<br>23<br>E   | 0.856<br>31.69<br>E | 170.5<br>-2.57<br>D  | 26.6<br>43.78<br>E | 62.9<br>-42.82<br>D | 84.4<br>-51.77<br>D  | 247.0  | Mn>Zn>P>N>Fe><br>K=Ca>Mg>Cu |
| 8. PINTO 114<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL     | 5.08<br>-7.64<br>D  | 0.413<br>-24.91<br>D | 3.65<br>16.61<br>E | 2.49<br>24.5<br>E | 0.778<br>19.69<br>E | 159.0<br>-9.14<br>D  | 26.1<br>41.08<br>E | 60.1<br>-45.36<br>D | 79.5<br>-54.57<br>D  | 243.51 | Mn>Zn>P>Fe>N><br>K>Mg>Ca>Cu |

\* DOP =  $[(C * 100) / Cref] - 100$

Donde: DPO.- Desviación del Porcentaje Óptimo.

C.- Concentración del elemento, resultado del análisis foliar.

Cref.- Concentración óptima del nutriente, propuesto para el cultivo en referencia.

D. Déficit (bajo).

O. Óptimo (suficiente).

E. Exceso (alto).

Cuadro 21. Continuación...

| Tratamiento                              | N                   | P                    | K                  | Ca                | Mg                  | Fe                  | Cu                 | Zn                  | Mn                   | Σ IDOP | Requerimientos              |
|--|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------|-----------------------------|
| S <sub>1</sub> .<br>ÍNDICE DOP*<br>NIVEL | 4.93<br>-10.36<br>D | 0.509<br>-7.45<br>D  | 4.03<br>28.75<br>E | 2.40<br>20<br>E   | 0.916<br>40.92<br>E | 178.8<br>2.17<br>E  | 27.3<br>47.57<br>D | 58.9<br>-46.45<br>D | 81.1<br>-53.66<br>D  | 257.35 | Mn>Zn>N>P><br>Fe>Ca>K>Mg>Cu |
| S <sub>2</sub> .<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL  | 4.78<br>-13.09<br>D | 0.387<br>-29.64<br>D | 3.50<br>11.82<br>E | 2.48<br>24<br>E   | 0.737<br>13.38<br>E | 172.3<br>-1.54<br>D | 25.8<br>39.46<br>E | 61.4<br>-44.18<br>D | 96.9<br>-44.63<br>D  | 221.75 | Mn>Zn>P>N>Fe><br>K>Mg>Ca>Cu |
| A.H. (70%)<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL        | 4.93<br>-10.36<br>D | 0.453<br>-17.64<br>D | 3.69<br>17.89<br>E | 2.49<br>24.5<br>E | 0.850<br>30.77<br>E | 174.0<br>-0.57<br>D | 27.6<br>49.19<br>E | 59.6<br>-45.82<br>D | 87.3<br>-50.11<br>D  | 246.85 | Mn>Zn>P>N><br>Fe>K>Ca>Mg>Cu |
| A.H. (20%)<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL        | 4.78<br>-13.09<br>D | 0.443<br>-19.45<br>D | 3.84<br>22.68<br>E | 2.39<br>19.5<br>E | 0.803<br>23.54<br>E | 177.1<br>1.20<br>E  | 25.5<br>37.84<br>E | 60.7<br>-44.82<br>D | 90.70<br>-48.17<br>D | 230.30 | Mn>Zn>P>N><br>Fe>Ca>K>Mg>Cu |

\* DOP = [ ( C \* 100 ) / Cref ] - 100

Donde:

DPO.- Desviación del Porcentaje Óptimo.

C.- Concentración del elemento, resultado del análisis foliar.

Cref.- Concentración óptima del nutrimento, propuesto para el cultivo en referencia.

D. Déficit (bajo).

O. Óptimo (suficiente).

E. Exceso (alto).

## 4.2 Segunda Etapa. Balance Nutricional del Frijol

### 4.2.1 Experimento IV. Relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v)

Una planta con deficiencia de hierro presenta clorosis por disminución de la cantidad de clorofila, lo que repercute en la eficiencia de la fotosíntesis y en una menor producción de grano, por lo tanto niveles adecuados de hierro evitan la clorosis, favorecen el balance nutricional e incrementan el rendimiento de grano. El presente trabajo se realizó con la finalidad determinar el efecto de la deficiencia de hierro (clorosis férrica) en el balance nutricional (relación del hierro con algunos macronutrientes y micronutrientes), rendimiento y sus componentes en plantas de frijol hierro eficientes e ineficientes. Se probaron cuatro dosis de Fe (0.4, 1.2, 2.4 y 6.0 ppm) en hidroponía, con tres variedades de frijol (Lagunero 87, AN-22 y Canario 101).

El pH de las soluciones se mantuvo ligeramente ácido como se observa en el Cuadro 22, esto es conveniente para una mejor solubilidad y aprovechamiento de los nutrientes por la planta. La C.E. en general en todos los tratamientos fue altamente salina, sin observarse síntomas por daños de salinidad en las plantas de frijol.

Cuadro 22. Tendencias del pH y de la C.E. de las soluciones nutrientes en estudio del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).

|                       | Dosis de Fe en ppm |                   |                   |                  |                   |
|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                       | Agua de Riego      | Solución 1<br>0.4 | Solución 2<br>1.2 | Solución3<br>2.4 | Solución 4<br>6.0 |
| pH                    | 6.2 - 6.7          | 6.3 - 6.6         | 6.3 - 6.6         | 6.3 - 6.6        | 6.4 - 6.6         |
| CE dS m <sup>-1</sup> | 2.55 - 2.77        | 3.47 - 6.33       | 4.10 - 6.25       | 4.85 - 7.28      | 3.46 - 7.58       |

#### 4.2.1.1 Niveles de Fe

Rendimiento de biomasa y otros factores fisiológicos.

Como se puede observar en el Cuadro A7 para la aplicación de diferentes niveles de Fe el análisis de varianza muestra diferencia altamente significativa en días a floración, altura de planta, peso de raíz, área foliar y materia seca.

Para la comparación de medias de los tratamientos con diferencia significativa se utilizó la prueba de Tukey. Los promedios y los grupos formados se presentan en el Cuadro 23.

En general la Prueba de los promedios (Tukey) muestra que el nivel de 0.4 ppm de Fe causó menor altura de planta, menor peso de raíz, menor área foliar y menor producción de materia seca por planta, además de retardar la floración aproximadamente 9 días en comparación con los tratamientos con mayor contenido de hierro.

Con el tratamiento de 1.2 ppm de Fe en la solución nutriente se encontró mayor altura de planta, junto con el tratamiento de 6 ppm de Fe; además se encontró mayor peso de raíz y área foliar, al igual que una mayor producción de materia seca por planta, aunque estadísticamente no hay diferencia entre los tratamientos con 2.4 y 6.0 ppm de Fe en la solución nutriente (Cuadro 23); este comportamiento se observó en los tres cultivares (Lagunero 87, AN-22 y Canario 101).

La mayor producción de biomasa no implica una mayor producción de grano (eficiencia de producción), por lo anterior es importante evaluar la eficiencia de los cultivares para traslocar los fotosintatos de la parte aérea a la de almacenamiento (grano); en este trabajo de investigación debido a las altas temperaturas, los cultivares presentaron poca floración y otros no florecieron, por lo que no se obtuvo producción de grano.

Cuadro 23. Comparación de medias para días a floración, altura de planta, área foliar y materia seca de los diferentes tratamientos del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).

| Tratamiento          | Días a floración | Altura de planta<br>cm | Peso de raíz<br>g planta <sup>-1</sup> | Área foliar<br>cm <sup>2</sup> /planta | Materia seca<br>g/planta |
|----------------------|------------------|------------------------|--|--|--------------------------|
| 0.4 ppm Fe           | 28.9 a           | 87.9 c                 | 5.27 b                                 | 2522.3 b                               | 13.7 b                   |
| 1.2 ppm Fe           | 19.0 c           | 157.0 a                | 11.88 a                                | 5641.5 a                               | 23.9 a                   |
| 2.4 ppm Fe           | 20.4 b           | 126.8 b                | 10.89 a                                | 4910.8 a                               | 21.3 a                   |
| 6.0 ppm Fe           | 20.2 b           | 143.0 a b              | 11.26 a                                | 4555.6 a                               | 21.2 a                   |
| AN-22                | 0.0 c            | 199.0 a                | 10.34 a                                | 4060.3 b                               | 21.1 a                   |
| Canario 101          | 29.2 b           | 35.2 c                 | 7.47 b                                 | 3734.1 b                               | 17.7 a                   |
| Lagunero 87          | 37.3 a           | 151.8 b                | 11.68 a                                | 5428.2 a                               | 21.3 a                   |
| variedad AN-22       |                  |                        |  |  |                          |
| 0.4 ppm Fe           | 0.0              | 132.7 c                | 6.32 c                                 | 2789.2 c                               | 15.98 c                  |
| 1.2 ppm Fe           | 0.0              | 228.3 a                | 12.31 a                                | 4793.0 a                               | 24.70 a                  |
| 2.4 ppm Fe           | 0.0              | 192.0 b                | 10.66 a b                              | 3390.2 b                               | 18.31 b                  |
| 6.0 ppm Fe           | 0.0              | 243.0 a                | 12.09 a                                | 5268.9 a                               | 25.43 a                  |
| variedad Canario 101 |                  |                        |  |  |                          |
| 0.4 ppm Fe           | 41.7 a           | 20.7 c                 | 2.67 b                                 | 1270.4 c                               | 10.24 b                  |
| 1.2 ppm Fe           | 25.0 b           | 44.7 a                 | 9.01 a                                 | 5245.6 a                               | 21.26 a                  |
| 2.4 ppm Fe           | 25.0 b           | 38.7 b                 | 8.64 a                                 | 4814.8 a                               | 18.73 a                  |
| 6.0 ppm Fe           | 25.0 b           | 36.7 b                 | 9.53 a                                 | 3605.7 b                               | 20.37 a                  |
| variedad Lagunero 87 |                  |                        |  |  |                          |
| 0.4 ppm Fe           | 45.0 a           | 110.3 c                | 6.83 b                                 | 3507.3 c                               | 14.77 c                  |
| 1.2 ppm Fe           | 32.0 c           | 198.0 a                | 14.33 a                                | 6885.8 a                               | 25.64 a                  |
| 2.4 ppm Fe           | 36.3 b           | 149.7 b                | 13.37 a                                | 6527.4 a                               | 26.92 a                  |
| 6.0 ppm Fe           | 35.7 b           | 149.3 b                | 12.17 a                                | 4792.3 b                               | 17.92 b                  |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05).

#### Grado de Clorosis.

Como se puede observar en el Cuadro A7 para la aplicación de diferentes niveles de Fe el análisis de varianza muestra diferencia altamente significativa en clorosis férrica a los 25 y 35 días después del trasplante.

La Prueba de los promedios (Tukey) muestra que la dosis de 0.4 ppm de Fe es la única que causa clorosis férrica en los cultivares (Cuadro 24). Repercutiendo en que los cultivares presenten menor altura de planta, peso de raíz, área foliar y biomasa por planta; La correlación negativa de la clorosis férrica con las anteriores variables (Cuadro A10) justifica lo anterior.

Cuadro 24. Comparación de medias para la variable clorosis a los 25 y 35 días después del trasplante del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).

| Tratamiento                                  | Clorosis<br>25 días |   | Clorosis<br>35 días |   |
|--|---------------------|---|---------------------|---|
| 0.4 ppm Fe                                   | 3.0                 | a | 2.0                 | a |
| 1.2 ppm Fe                                   | 1.0                 | b | 1.0                 | b |
| 2.4 ppm Fe                                   | 1.0                 | b | 1.0                 | b |
| 6.0 ppm Fe                                   | 1.0                 | b | 1.0                 | b |
| AN-22  | 1.20                | c | 1.06                | b |
| Canario 101                                  | 1.6                 | a | 1.51                | a |
| Lagunero 87                                  | 1.4                 | b | 1.14                | b |
| Variedades en la solución 1 ( 0.4 ppm de Fe) |                     |   |                     |   |
| AN-22  | 2.0                 | c | 1.3                 | b |
| Canario 101                                  | 4.32                | a | 3.7                 | a |
| Lagunero 87                                  | 3.0                 | b | 1.6                 | b |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

#### Contenido de Clorofila.

Como se puede observar en el Cuadro A7 para la aplicación de diferentes niveles de Fe el análisis de varianza muestra diferencia altamente significativa en el contenido de clorofila “a”, “b” y total, relación clorofila a:b,

La prueba de medias muestra que en todos los cultivares estudiados (AN-22, Canario 101 y Lagunero 87). La dosis de 0.4 ppm de Fe es la que produjo menor cantidad de Clorofila a, b, total (a+b) y menor relación a/b en la planta, que los otros niveles de Fe (Cuadro 25).

El nivel de 6.0 ppm de Fe causa un mayor contenido de clorofila a, b y total en las hojas de todos los cultivares; comportándose estadísticamente igual los tratamientos con 1.2 y 2.4 ppm de Fe.

Cuadro 25. Comparación de medias para contenidos de clorofila a, b, a+b y la relación a/b del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).

| Tratamiento                              | Clorofila a | Clorofila b | Clorofila total | Relación a/b |
|--|-------------|-------------|-----------------|--------------|
| 0.4 ppm Fe                               | 2.66 c      | 1.79 c      | 4.45 c          | 1.46 b       |
| 1.2 ppm Fe                               | 7.38 b      | 4.31 b      | 11.68 b         | 1.73 a       |
| 2.4 ppm Fe                               | 7.68 b      | 4.47 b      | 12.14 b         | 1.73 a       |
| 6.0 ppm Fe                               | 8.42 a      | 5.07 a      | 13.50 a         | 1.65 a       |
| AN-22                                    | 7.01 a      | 4.11 a      | 11.12 a         | 1.71 a       |
| Canario 101                              | 5.25 b      | 3.21 b      | 8.46 b          | 1.57 b       |
| Lagunero 87                              | 7.35 a      | 4.41 a      | 11.75 a         | 1.65 a b     |
| Niveles de Fe en la variedad Lagunero 87 |             |             |                 |              |
| 0.4 ppm Fe                               | 2.77 c      | 1.78 c      | 4.55 c          | 1.56 a       |
| 1.2 ppm Fe                               | 7.53 b      | 4.67 b      | 12.20 b         | 1.62 a       |
| 2.4 ppm Fe                               | 8.71 b      | 5.20 b      | 13.90 b         | 1.67 a       |
| 6.0 ppm Fe                               | 10.40 a     | 5.96 a      | 16.36 a         | 1.75 a       |
| Niveles de Fe en la variedad AN-22       |             |             |                 |              |
| 0.4 ppm Fe                               | 3.59 b      | 2.12 c      | 5.70 b          | 1.70 a       |
| 1.2 ppm Fe                               | 7.99 a      | 4.75 b      | 12.74 a         | 1.68 a       |
| 2.4 ppm Fe                               | 7.63 a      | 4.46 b      | 12.09 a         | 1.71 a       |
| 6.0 ppm Fe                               | 8.82 a      | 5.10 a      | 13.93 a         | 1.73 a       |
| Niveles de Fe en la variedad Canario 101 |             |             |                 |              |
| 0.4 ppm Fe                               | 1.61 b      | 1.45 b      | 3.09 b          | 1.12 c       |
| 1.2 ppm Fe                               | 6.61 a      | 3.50 a      | 10.11 a         | 1.88 a       |
| 2.4 ppm Fe                               | 6.72 a      | 3.73 a      | 10.44 a         | 1.80 a       |
| 6.0 ppm Fe                               | 6.04 a      | 4.16 a      | 10.20 a         | 1.47 b       |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

Contenido foliar de nutrientes.

En cuanto al contenido foliar de nutrientes (Cuadro A8) se encontró diferencia altamente significativa en P, K, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn; diferencia significativa para Ca y no significativa para N.



La prueba de medias (Tukey) para soluciones nutritivas con diferentes niveles de Fe, conforma mayor número de grupos en el contenido foliar de microelementos que en los macroelementos (Cuadro 26), teniendo mayor contenido foliar de N, P, K, Ca, Mg, Zn y Mn con la solución con menor contenido de hierro (0.4 ppm) y menor contenido de Fe y Cu con la misma solución.

En cuanto al contenido de Fe, este tiende a incrementarse en las hojas conforme aumenta el contenido en la solución.

Los niveles de Cu encontrados en las plantas cultivadas en soluciones con 1.2, 2.4 y 6.0 ppm de Fe se consideran adecuados ya que Benton (1983) indica que concentraciones de Cu entre 20 y 100 ppm son suficientes para la planta. En cuanto a el Fe, en general los valores de Fe total en la planta se consideran adecuados, por lo que las plantas desarrolladas en las soluciones 2, 3 y 4 presentan una ausencia de clorosis férrica.

Para las proporciones de Fe con otros nutrimentos (Cuadro A9) se encontró diferencia altamente significativa para todos los nutrimentos en los diferentes niveles de Fe. En el Cuadro 27 la prueba de medias Tukey muestra que las soluciones nutritivas de mayor proporción Fe:nutrimentos fueron en general la solución 2 (1.2 ppm de Fe) y la solución 4 (6.0 ppm de Fe); y las de menor relación Fe:nutrimentos, fue la solución 1 con 0.4 ppm de Fe.

El análisis de los índices DOP (Desviación al Porcentaje Óptimo) muestra que las soluciones nutritivas en estudio con diferentes contenidos de Fe en general contienen niveles por arriba del porcentaje óptimo de Zn, Ca, Cu y Mg; a excepción de la solución con menor contenido de Fe (0.4 ppm) que no presenta excesos de Cu, siendo requerido de acuerdo al siguiente orden  $Fe > Mn > Cu > N$  (Cuadro 28). En general los nutrimentos con mayor requerimiento en las otras soluciones fue de acuerdo al siguiente orden  $Mn > Fe > P$ .

Cuadro 26. Comparación de medias para contenido nutrimental del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).

| Trat.            | N<br>% | P<br>%  | K<br>% | Ca<br>%  | Mg<br>% | Fe<br>ppm | Cu<br>ppm | Zn<br>ppm | Mn<br>ppm |
|------------------|--------|---------|--------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| S1. (0.4 ppm Fe) | 5.33 a | 0.618 a | 3.41 a | 2.47 a   | 0.98 a  | 70.8 c    | 16.7 c    | 143.8 a   | 111.4 a   |
| S2. (1.2 ppm Fe) | 4.67 a | 0.469 b | 2.37 b | 2.28 b   | 0.79 b  | 132.0 a   | 40.73 b   | 112.2 bc  | 48.9 c    |
| S3. (2.4 ppm Fe) | 5.12 a | 0.479 b | 3.42 a | 2.31 a b | 0.67 c  | 101.4 b   | 53.6 a    | 93.2 c    | 64.2 bc   |
| S4. (6.0 ppm Fe) | 4.93 a | 0.468 b | 2.21 b | 2.39 a b | 0.87 b  | 153.9 a   | 20.5 c    | 127.4 ab  | 71.2 b    |
| AN-22            | 4.69 a | 0.533 a | 3.08 a | 2.29 a   | 0.81 b  | 119.3 a   | 33.66 a   | 131.0 a   | 86.9 a    |
| CANARIO 101      | 5.21 a | 0.499 a | 2.71 b | 2.37 a   | 0.88 a  | 098.5 b   | 33.66 a   | 84.8 b    | 46.4 b    |
| LAGUNERO 87      | 5.14 a | 0.493 a | 2.77 b | 2.43 a   | 0.79 b  | 125.8 a   | 31.35 a   | 141.6 a   | 88.4 a    |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

Cuadro 27. Comparación de medias (Tukey) para relación del contenido foliar del Fe con otros nutrientes del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).

| Trat.            | Fe:N    | Fe:P     | Fe:K   | Fe:Ca  | Fe:Mg   | Fe: Cu | Fe:Zn | Fe: Mn |
|------------------|---------|----------|--------|--------|---------|--------|-------|--------|
| S1. (0.4 ppm Fe) | 13.3 c  | 114.6 c  | 20.8 c | 28.7 c | 72.2 b  | 4.20 b | 0.5 b | 0.6 c  |
| S2. (1.2 ppm Fe) | 28.3 a  | 281.4 a  | 55.7 b | 57.9 a | 167.1 a | 3.2 bc | 1.2 a | 2.7 a  |
| S3. (2.4 ppm Fe) | 19.08 b | 211.7 b  | 29.6 c | 43.9 b | 151.3 a | 1.9 c  | 1.1 a | 1.6 b  |
| S4. (6.0 ppm Fe) | 31.2 a  | 328.8 a  | 69.6 a | 64.4 a | 176.9 a | 7.5 a  | 1.2 a | 2.2 ab |
| AN-22            | 25.4 a  | 223.8 ab | 38.7 a | 52.1 a | 147.3 a | 3.5 a  | 0.9 b | 1.4 b  |
| CANARIO 101      | 18.9 b  | 197.4 b  | 36.3 a | 41.6 b | 111.9 b | 2.9 a  | 1.2 a | 2.1 a  |
| LAGUNERO 87      | 24.5 a  | 255.2 a  | 45.4 a | 51.8 a | 159.2 a | 4.0 a  | 0.9 b | 1.4 b  |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

#### 4.2.1.2 Cultivares

Rendimiento de biomasa y otros factores fisiológicos.

Como se puede observar en el Cuadro A7 el análisis de varianza para cultivares muestra diferencia no significativa en producción de biomasa y diferencia altamente significativa en días a floración, altura de planta, peso de raíz y área foliar.

En cuanto a la interacción en los niveles de Fe Vs Cultivares se encontró diferencia altamente significativa para días a floración y altura de planta; por lo anterior la discusión de estas variables se enfoca principalmente en la interpretación de las interacciones. Para peso de raíz, área foliar y materia seca no se encontró interacción y se discutirán a continuación.

En general la Prueba de los promedios (Tukey) muestra que con el cultivar Canario 101 se obtuvo menor altura de planta, menor peso de raíz, menor área foliar y menor producción de materia seca por planta, en comparación con los cultivares AN-22 y Lagunero 87 (Cuadro 23)

Los cultivares AN-22 y Lagunero 87 se comportaron estadísticamente igual en peso de raíz y producción de biomasa y muestran diferencia altamente significativa para área foliar, siendo mayor para el cv Lagunero 87 (Cuadro 23).

Como se mencionó anteriormente en la interacción niveles de Fe y cultivares se encontró diferencia altamente significativa en días a floración y altura de planta (Cuadro A7).

Floración. Los cultivares Canario 101 y Lagunero 87 retardaron su floración con el tratamiento de 0.4 ppm de Fe en la solución nutriente en comparación con los otros niveles de Fe (Cuadro 23). La variedad AN-22 no produjo flores probablemente por las

altas temperaturas y por ser de ciclo tardío. En los otros cultivares, las altas temperaturas no permitieron la polinización de las flores por lo cual no se tuvo rendimiento de grano.

Altura de planta. El cultivar que presentó menor altura de planta fue el Canario 101 por tener crecimiento determinado. En el Cuadro 23 se observa que el nivel de 0.4 ppm de Fe causó un crecimiento menor en los tres cultivares analizados en comparación de las soluciones con mayor contenido de Fe.

Grado de clorosis férrica.

Como se puede observar en el Cuadro A7 el análisis de varianza para cultivares muestra diferencia altamente significativa en clorosis férrica a los 25 y 35 días después del trasplante.

En cuanto a la interacción en los niveles de Fe Vs Cultivares se encontró diferencia altamente significativa para clorosis férrica a los 25 y 35 días después del trasplante.

Con la solución nutritiva de 0.4 ppm de Fe, es notable la diferencia en la clorosis férrica entre el cultivar Fe-ineficiente (Canario 101) con los cultivares Lagunero 87 y AN-22 que a los 35 días después del trasplante muestran un ligera clorosis (Cuadro 24); el cultivar AN-22 es Fe eficiente por lo que mediante algún mecanismo es capaz de disminuir los efectos de la clorosis férrica.

Contenido de clorofila.

Como se puede observar en el Cuadro A7 el análisis de varianza para cultivares muestra diferencia altamente significativa en el contenido de clorofila “a”, “b” y total, relación clorofila a:b. Y para la interacción niveles de Fe x cultivar, se encontró

diferencia altamente significativa para el contenido de clorofila “a”, total y relación clorofila a:b; y diferencia significativa para clorofila “b” (Cuadro A7).

En los tres cultivares se encontró mayor contenido de clorofila a en comparación al contenido de clorofila b, esto es importante ya que la clorofila a es de mayor relevancia en la fotosíntesis (Gutiérrez *et al.*, 1994).

En todos los niveles de Fe el cultivar Canario 101 fue el que produjo menor contenido de clorofila en las hojas en comparación a los cultivares AN-22 y lagunero 87. Los cultivares de frijol AN-22 y Lagunero 87 en todos los niveles de Fe tuvieron valores muy similares en cuanto a contenido de clorofila a, b y total superando a los contenidos presentados por el Canario 101.

Contenido foliar de nutrimentos.

En cuanto a contenido foliar de nutrimentos el análisis de varianza para el factor de variación cultivares (Cuadro A8) encontró diferencia altamente significativa para K, Mg, Fe, Zn y Mn; y no significativa para N, P, Ca y Cu.

El cultivar Canario 101 presenta menor contenido foliar de Fe, Zn y Mn. Estadísticamente los cultivares AN-22 y Lagunero 87 tuvieron el mismo contenido foliar de nutrimentos, a excepción del K que en el cultivar AN-22 presenta mayor contenido (Cuadro 26).

En general los valores de Fe total en la planta se consideran adecuados, por lo que las plantas desarrolladas en las soluciones 2, 3 y 4 presentaron ausencia de clorosis férrica.

En cuanto a la interacción niveles de Fe x cultivares se encontró diferencia altamente significativa para K, Mg y Fe y no significativa para los demás elementos.

En la proporción del Fe con otros nutrimentos el análisis de varianza para el factor de variación cultivares (Cuadro A9) encontró diferencia altamente significativa para N, Ca, Mg, Zn y Mn; significativa para P y no significativa para K y Cu.

El cultivar Canario 101 obtuvo menores proporciones de Fe:nutrimentos con N, P, Ca, Mg y Cu. Para los nutrimentos Zn y Mn se encontraron proporciones mayores.

El análisis de los índices DOP (Desviación al Porcentaje Óptimo) muestra que los nutrimentos que se requirieron en todos los cultivares en estudio fueron Mn, Fe, P y K siendo el Mn y el Fe los nutrimentos con mayor desviación al porcentaje óptimo y para el cultivar Canario 101 además de los anteriores requirió de Zn (Cuadro 28); por lo que podríamos considerar que es un cultivar con problemas para la absorción de este elemento. Los nutrimentos que se encuentran en exceso fueron Ca, Mg, Cu y Zn.

Cuadro 28. Contenido nutrimental en porcentaje para macronutrientes y en ppm para micronutrientes en base a materia seca e índices DOP para los tratamientos del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo p-v).

| Tratamiento                             | N                   | P                    | K                   | Ca                | Mg                | Fe                   | Cu                  | Zn                 | Mn                  | Σ IDOP | Requerimientos                   |
|---|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------|----------------------------------|
| S1 (0.4 ppm Fe)<br>ÍNDICE DOP*<br>NIVEL | 5.33<br>-3.09<br>D  | 0.618<br>12.36<br>E  | 3.41<br>8.95<br>E   | 2.47<br>23.5<br>E | 0.98<br>50.8<br>E | 70.8<br>-59.5<br>D   | 16.7<br>-9.7<br>D   | 143.8<br>30.7<br>E | 111.4<br>-36.3<br>D | 235.01 | Fe>Mn>Cu>N><br>K>P >Ca>Zn<br>>Mg |
| S2 (1.2 ppm Fe)<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL  | 4.67<br>-15.09<br>D | 0.469<br>-14.73<br>D | 2.37<br>-24.28<br>D | 2.28<br>14.0<br>E | 0.79<br>21.5<br>E | 132.0<br>-24.6<br>D  | 40.73<br>120.2<br>E | 112.2<br>2.0<br>E  | 48.9<br>-72.1<br>D  | 308.5  | Mn>Fe>K>N>P><br>Zn>Ca>Mg>Cu      |
| S3 (2.4 ppm Fe)<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL  | 5.12<br>-6.91<br>D  | 0.479<br>-12.91<br>D | 3.42<br>9.27<br>E   | 2.31<br>15.5<br>E | 0.67<br>3.08<br>E | 101.4<br>-42.1<br>D  | 53.6<br>189.7<br>E  | 93.2<br>-15.3<br>D | 64.2<br>-63.3<br>D  | 358.07 | Mn>Fe>Zn>P>N><br>Mg>K> Ca> Cu    |
| S4 (6.0 ppm Fe)<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL  | 4.93<br>-10.36<br>D | 0.468<br>-14.91<br>D | 2.21<br>-29.39<br>D | 2.39<br>19.5<br>E | 0.87<br>33.8<br>E | 153.9<br>-12.1<br>D  | 20.5<br>10.8<br>E   | 127.4<br>15.8<br>E | 71.2<br>-59.3<br>D  | 206.01 | Mn>K>P>Fe>N><br>Cu>Zn>Ca>Mg      |
| AN-22<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL            | 4.69<br>-14.73<br>D | 0.533<br>-3.09<br>D  | 3.08<br>-1.60<br>D  | 2.29<br>14.5<br>E | 0.81<br>24.6<br>E | 119.3<br>-31.8<br>D  | 33.65<br>81.9<br>E  | 131.0<br>19.1<br>E | 86.9<br>-50.3<br>D  | 241.74 | Mn>Fe>N>P>K><br>Ca>Zn > Mg>Cu    |
| CANARIO 101<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL      | 5.21<br>-5.27<br>D  | 0.499<br>-9.27<br>D  | 2.71<br>-13.42<br>D | 2.37<br>18.5<br>E | 0.88<br>35.4<br>E | 098.5<br>-43.71<br>D | 33.66<br>81.9<br>E  | 84.8<br>-22.9<br>D | 46.4<br>-73.5<br>D  | 303.90 | Mn>Fe>Zn>K>P><br>N<br>Ca>Mg>Cu   |
| LAGUNERO 87<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL      | 5.14<br>-6.55<br>D  | 0.493<br>-10.36<br>D | 2.77<br>-11.50<br>D | 2.43<br>21.5<br>E | 0.79<br>21.5<br>E | 125.8<br>-28.11<br>D | 31.35<br>69.5<br>E  | 141.6<br>28.7<br>E | 88.4<br>-49.5<br>D  | 247.24 | Mn >Fe>K>P>N><br>Mg=Ca>Zn >Cu    |

\* DOP = [ ( C \* 100 ) / Cref ] - 100

Donde:DPO.- Desviación del Porcentaje Óptimo.

C.- Concentración del elemento, resultado del análisis foliar.

Cref.- Concentración óptima del nutriente, propuesto para el cultivo en referencia.

D. Déficit (bajo).

O. Óptimo (suficiente).

E. Exceso (alto).





#### 4.2.2 Experimento V. Relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)

En el ciclo P-V debido a las altas temperaturas los cultivares presentaron poca floración y algunos no florecieron, por lo que no se obtuvo producción de grano en los cultivares en estudio. Debido a lo anterior se planteó realizar el mismo experimento en condiciones más favorables para el cultivo en el ciclo Otoño-Invierno. El presente trabajo al igual que el experimento IV, se realizó con la finalidad de encontrar el adecuado balance de nutrientes con respecto al hierro en la planta que permita la máxima producción del cultivo de acuerdo a su potencial genético y determinar el efecto de la deficiencia de hierro (clorosis férrica) en el rendimiento y sus componentes en frijol. Se probaron cuatro dosis de Fe (0.9, 1.2, 2.4 y 8.6 ppm) en la solución Hoagland 2, con tres variedades de frijol (Lagunero 87, AN-22 y Canario 101).

El pH de las soluciones se mantuvo ligeramente ácido, variando de 6.3 a 6.8, con la finalidad de mantener una mejor solubilidad y aprovechamiento de los nutrientes por la planta (Cuadro 29). La C.E. en general en todos los tratamientos fue altamente salina (de 3.38 a 6.38 dS m<sup>-1</sup>), sin observarse síntomas por daños de salinidad en las plantas de frijol. El agua de riego originalmente presentó un pH de 6.7 y una C.E. de 2.35 dS m<sup>-1</sup>.

Cuadro 29. Tendencias del pH y de la C.E. de las soluciones nutrientes en estudio del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i).

|                       | Dosis de Fe en ppm |                         |                         |                         |                         |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                       | Agua de Riego      | Solución 1 (0.9 ppm Fe) | Solución 2 (1.2 ppm Fe) | Solución 3 (2.4 ppm Fe) | Solución 4 (8.6 ppm Fe) |
| pH                    | 6.7 - 6.8          | 6.4 - 6.8               | 6.3 - 6.7               | 6.3 - 6.6               | 6.3 - 6.7               |
| CE dS m <sup>-1</sup> | 2.35 - 2.68        | 3.38 - 5.32             | 3.99 - 5.89             | 4.75 - 6.19             | 4.18 - 6.38             |

#### 4.2.2.1 Niveles de Fe

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

Para la aplicación de niveles de Fe, el análisis de varianza muestra diferencia altamente significativa para días a floración, altura de planta, peso de raíz, área foliar, materia seca y rendimiento de grano por planta (Cuadro A11).

La diferencia entre promedios se determinó por la prueba de Tukey, para todos los tratamientos. Como se puede observar en el Cuadro 30, en general con el nivel de 0.9 ppm de Fe se encontró menor altura de planta, menor área foliar, menor peso de raíz, menor producción de materia seca y menor peso de grano por planta, además de retardar la floración de 6 a 10 días en comparación con los otros tratamientos con mayor contenido de hierro. El tratamiento con 1.2 ppm de Fe en la solución nutritiva, causó una mayor altura de planta, área foliar, peso de raíz y peso de grano por planta; además de una floración más temprana (37 días después del trasplante); con el tratamiento de 2.4 ppm de Fe se obtuvo mayor área foliar. No se encontró diferencia estadística en los tratamientos de 1.2, 2.4 y 8.6 ppm de Fe en cuanto a peso de raíz, materia seca y peso de grano por planta.

Grado de clorosis férrica.

Para la aplicación de niveles de Fe, el análisis de varianza muestra diferencia altamente significativa para en clorosis férrica a los 25 días después del trasplante (Cuadro A11).

En cuanto a grado de clorosis férrica los diferentes niveles de Fe mostraron diferencias a los 25 días después del trasplante, la prueba de los promedios (Tukey) muestra la clorosis más marcada en el nivel de 0.9 ppm de Fe; a los 35 días no se presentó clorosis en ningún tratamiento (Cuadro 31) comportándose estadísticamente iguales.

Cuadro 30. Comparación de medias para días a floración, altura de planta, área foliar y materia seca de los diferentes tratamientos del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i).

| Tratamiento                              | Clorosis<br>25 días | Clorosis<br>35 días | Días a<br>floración | Altura de<br>planta<br>cm | Área foliar<br>cm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> | Peso Raíz, g | Materia seca<br>g planta <sup>-1</sup> | Peso grano<br>g planta <sup>-1</sup> |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|---|--------------|--|--------------------------------------|
| 0.9 ppm Fe                               | 3.30 a              | 1.02 a              | 47.8 a              | 23.8 c                    | 247.6 c   | 5.49 b       | 6.20 b                                 | 2.44 b                               |
| 1.2 ppm Fe                               | 1.35 b              | 1.00 a              | 36.9 d              | 85.7 a                    | 2212.1 a  | 11.55 a      | 32.54 a                                | 62.74 a                              |
| 2.4 ppm Fe                               | 1.00 c              | 1.00 a              | 41.7 b              | 57.9 b                    | 2811.9 a  | 11.15 a      | 34.11 a                                | 57.60 a                              |
| 8.6 ppm Fe                               | 1.00 c              | 1.02 a              | 38.8 c              | 62.5 a                    | 1056.9 b  | 10.78 a      | 33.68 a                                | 61.58 a                              |
| AN-22                                    | 1.40 b              | 1.00 b              | 44.5 a              | 100.9 a                   | 1549.8 a  | 10.84 a      | 30.11 b                                | 64.04 a                              |
| Canario 101                              | 1.80 a              | 1.02 a              | 38.4 c              | 19.5 c                    | 1594.9 a  | 7.55 b       | 16.04 c                                | 25.56 c                              |
| Lagunero 87                              | 1.44 b              | 1.00 b              | 40.9 b              | 51.9 b                    | 1601.7 a  | 10.85 a      | 33.74 a                                | 48.68 b                              |
| Niveles de Fe en la variedad AN-22       |                     |                     |                     |                           |   |              |  |                                      |
| 0.9 ppm Fe                               | 2.70 a              | 1.00 a              | 52.0 a              | 39.5 d                    | 274.4 c   | 6.32 b       | 7.60 b                                 | 7.34 b                               |
| 1.2 ppm Fe                               | 1.15 b              | 1.00 a              | 37.7 d              | 164.1 a                   | 2574.7 a  | 12.64 a      | 41.36 a                                | 86.64 a                              |
| 2.4 ppm Fe                               | 1.00 c              | 1.00 a              | 48.0 b              | 93.0 c                    | 2340.9 a  | 12.17 a      | 33.60 a                                | 79.56 a                              |
| 8.6 ppm Fe                               | 1.00 c              | 1.00 a              | 40.3 c              | 107.2 b                   | 1009.0 b  | 12.24 a      | 37.88 a                                | 82.60 a                              |
| Niveles de Fe en la variedad Canario 101 |                     |                     |                     |                           |   |              |  |                                      |
| 0.9 ppm Fe                               | 4.25 a              | 1.04 b              | 45.7 a              | 11.13 c                   | 130.9 c   | 2.67 b       | 1.87 c                                 | 0.00 b                               |
| 1.2 ppm Fe                               | 1.74 b              | 1.00 a              | 35.3 c              | 26.43 a                   | 2052.6 b  | 9.01 a       | 16.30 b                                | 34.64 a                              |
| 2.4 ppm Fe                               | 1.00 c              | 1.00 a              | 35.7 c              | 22.60 a                   | 3016.5 a  | 9.87 a       | 26.20 a                                | 30.64 a                              |
| 8.6 ppm Fe                               | 1.00 c              | 1.06 a              | 37.0 b              | 18.00 b                   | 1179.6 b  | 8.64 a       | 19.81 b                                | 36.98 a                              |
| Niveles de Fe en la variedad Lagunero 87 |                     |                     |                     |                           |   |              |  |                                      |
| 0.9 ppm Fe                               | 2.96 a              | 1.00 a              | 45.7 a              | 20.9 b                    | 337.3 c   | 7.50 b       | 9.13 b                                 | 0.00 b                               |
| 1.2 ppm Fe                               | 1.17 b              | 1.00 a              | 37.7 c              | 66.5 a                    | 2009.2 b  | 13.00 a      | 39.96 a                                | 66.94 a                              |
| 2.4 ppm Fe                               | 1.00 c              | 1.00 a              | 41.3 b              | 58.0 a                    | 3078.3 a  | 11.43 a      | 42.53 a                                | 62.60 a                              |
| 8.6 ppm Fe                               | 1.00 c              | 1.00 a              | 39.0 b              | 62.4 a                    | 982.1 b   | 11.46 a      | 43.36 a                                | 65.16 a                              |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

## Contenido de Clorofila.

Para las soluciones con diferentes niveles de Fe el análisis de varianza nos muestra diferencia altamente significativa en lo referente al contenido de clorofila total, clorofila a, clorofila b y la relación clorofila a/b (Cuadro 32). La prueba de medias muestra que la dosis de 0.9 ppm de Fe es la que contiene menor cantidad de clorofila a, b, total (a+b) en la planta, que los otros niveles de Fe (Cuadro 33). El nivel de 8.6 ppm de Fe causa un mayor contenido de clorofila a, b y total en las hojas.

## Contenido foliar de nutrimentos.

Para conocer la relación del Fe con los nutrimentos esenciales para la planta, se realizó el análisis foliar (Cuadro A12). Para soluciones se encontró diferencia altamente significativa en P, K, Ca, Fe, Cu, Zn y Mn; y diferencia significativa para Mg; y, diferencia no significativa solo para N. La prueba de medias (Tukey) con la solución con menor contenido de hierro (0.9 ppm) se encontró mayor contenido foliar de P, Zn y Mn y menor contenido de Fe y Cu (Cuadro 34). En cuanto al contenido de Fe, este tiende a incrementarse en las hojas conforme aumenta el contenido en la solución.

En cuanto a la proporción del Fe con otros nutrimentos, se encontró diferencia altamente significativa para todas las proporciones (Cuadro A13).

En el Cuadro 35 se observa que las soluciones nutritivas de mayor proporción Fe:nutrimentos fueron la solución 2 (1.2 ppm de Fe) y la solución 4 (8.6 ppm de Fe).

## Índice de desviación al porcentaje óptimo (DPO).

Se determinó el índice de desviación al porcentaje óptimo (DPO) el cuál muestra que las soluciones en estudio con 2.4 y 8.6 ppm de Fe contienen niveles por arriba del porcentaje óptimo de Ca, K y Cu; el Cu también presentó deficiencia en las soluciones con 0.9 y 1.2 ppm de Fe. En general los nutrimentos con mayor requerimiento en todas

las soluciones fue de acuerdo al siguiente orden  $Mn > Zn > Mg$ . La solución con menor contenido de Fe (0.9 ppm) presenta el siguiente orden de requerimientos  $Fe > Zn > Mg > Mn$ , presentando las mismas deficiencias además del Fe; la solución con 1.2 ppm de Fe presenta deficiencias de Mn, Zn, K, Mg, presentando deficiencia de K a diferencia de las otras soluciones.

#### 4.2.2.2 Cultivares

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

Para los cultivares el análisis de varianza muestra diferencia no significativa en área foliar y altamente significativa en las demás variables.

La variedad AN-22 produjo 64.04 g de grano por planta, siendo la mejor entre las variedades probadas con rendimientos de 48.7 g de grano por planta y 25.6 g de grano por planta, para el Lagunero 87 y Canario 102 respectivamente. De los tres genotipos utilizados (Lagunero 87, AN-22 y Canario 101), el cultivar Canario 101 obtuvo menor: días a floración (38 días), altura de planta (crecimiento determinado), peso de raíz, biomasa y peso de grano por planta.

Grado de clorosis.

En cuanto a grado de clorosis férrica los cultivares mostraron diferencias altamente significativas a los 25 y 35 días después del trasplante. A los 25 días es notable la diferencia entre el cultivar Fe-ineficiente (Canario 101) con los cultivares Lagunero 87 y AN-22 pero a partir de los 35 días después del trasplante los cultivares no presentaron síntomas de clorosis férrica.

Cabe destacar que a los 25 días después del trasplante, en la solución nutritiva con 0.9 ppm de Fe, el cultivar con mayor clorosis fue el Canario 101 y el más resistente a la clorosis, fue el AN-22.

Cuadro 31. Comparación de medias para la variable Clorosis a los 25 y 35 días después del trasplante del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i).

| Tratamiento                                  | Clorosis, 25 días | Clorosis, 35 días |
|--|-------------------|-------------------|
| 0.9 ppm Fe                                   | 3.3 a             | 1.02 a            |
| 1.2 ppm Fe                                   | 1.35 b            | 1.00 a            |
| 2.4 ppm Fe                                   | 1.00 c            | 1.00 a            |
| 8.6 ppm Fe                                   | 1.00 c            | 1.02 a            |
| AN-22  | 1.40 b            | 1.00 a            |
| Canario 101                                  | 1.80 a            | 1.02 a            |
| Lagunero 87                                  | 1.44 b            | 1.00 a            |
| Variedades en la solución 1 ( 0.9 ppm de Fe) |                   |                   |
| AN-22  | 2.70 c            | 1.00 a            |
| Canario 101                                  | 4.25 a            | 1.04 a            |
| Lagunero 87                                  | 2.96 b            | 1.00 a            |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

Contenido de clorofila.

En cuanto a contenido de clorofilas en los cultivares el análisis de varianza solo se encontró diferencia significativa para contenido de clorofila a (Cuadro 32).

Cuadro 32. Cuadrados medios de las variables clorofila a, b, total y la relación clorofila a/b del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i).

| F.V.        | g.l. | Clorofila a | Clorofila b | Clorofila a+b | Relación a/b |
|-------------|------|-------------|-------------|---------------|--------------|
| Bloques     | 2    | 3.011308 NS | 2.72685 NS  | 10.939186 NS  | 0.0132038 NS |
| Niveles Fe  | 3    | 19.0297 **  | 30.36326 ** | 92.89 **      | 0.0933285 ** |
| Cultivares  | 2    | 4.836858 *  | 4.16627 NS  | 16.74501 NS   | 0.157344 NS  |
| Interacción | 6    | 2.738758 NS | 2.524510 NS | 9.86565 NS    | 0.04674 NS   |
| Error       | 22   | 1.4015053   | 2.68756     | 7.046619      | 0.15601187   |
| C.V %       |      | 12.18       | 26.95       | 16.801        | 22.78        |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (95 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (99 %).

La prueba de medias muestra que la variedad Canario 101, es la de menor contenido de clorofila a en las hojas (Cuadro 33). Los cultivares de frijol AN-22 y Lagunero 87 tuvieron valores muy similares en cuanto a contenido de clorofila a, b y total superando a los contenidos presentados por el Canario 101. Al igual que en el

experimento anterior en los tres cultivares se encontró mayor contenido de clorofila a en comparación al contenido de clorofila b, esto es importante ya que la clorofila a es de mayor relevancia en la fotosíntesis (Gutiérrez, *et al.*, 1994).

Cuadro 33. Comparación de medias para contenidos de clorofila a, b, a+b y la relación a/b del experimento relación del hierro con macronutrientos y micronutrientos en frijol (ciclo o-i).

| Tratamiento                              | Clorofila a | Clorofila b | Clorofila total | Relación a/b |
|--|-------------|-------------|-----------------|--------------|
| 0.9 ppm Fe                               | 7.77 b      | 4.37 b      | 12.141 b        | 1.94 a b     |
| 1.2 ppm Fe                               | 9.44 a      | 4.61 b      | 14.062 b        | 2.07 a       |
| 2.4 ppm Fe                               | 10.83 a     | 7.67 a      | 18.498 a        | 1.46 b       |
| 8.6 ppm Fe                               | 10.83 a     | 7.67 a      | 18.498 a        | 1.46 b       |
| AN-22                                    | 9.62 a b    | 6.34 a      | 15.95 a         | 1.63 a       |
| Canario 101                              | 9.15 b      | 5.41 a      | 14.55 a         | 1.86 a       |
| Lagunero 87                              | 10.40 a     | 6.50 a      | 16.90 a         | 1.72 a       |
| Niveles de Fe en la variedad AN-22       |             |             |                 |              |
| 0.9 ppm Fe                               | 8.12 c      | 5.13 c      | 13.25 b         | 1.73 b       |
| 1.2 ppm Fe                               | 9.04 b      | 4.49 c      | 13.53 b         | 2.01 a       |
| 2.4 ppm Fe                               | 11.90 a     | 9.03 a      | 20.93 a         | 1.34 c       |
| 8.6 ppm Fe                               | 9.40 b      | 6.70 b      | 16.09 a         | 1.43 c       |
| Niveles de Fe en la variedad Canario 101 |             |             |                 |              |
| 0.9 ppm Fe                               | 6.97        | 3.51 c      | 10.48 c         | 2.16 a       |
| 1.2 ppm Fe                               | 9.02        | 4.14 b      | 13.16 b         | 2.23 a       |
| 2.4 ppm Fe                               | 9.40        | 6.70 a      | 16.09 a         | 1.43 b       |
| 8.6 ppm Fe                               | 11.20       | 7.29 a      | 18.48 a         | 1.60 b       |
| Niveles de Fe en la variedad Lagunero 87 |             |             |                 |              |
| 0.9 ppm Fe                               | 8.23        | 4.47 c      | 12.69 c         | 1.94 a       |
| 1.2 ppm Fe                               | 10.27       | 5.22 c      | 15.50 b         | 1.98 a       |
| 2.4 ppm Fe                               | 11.20       | 7.29 b      | 18.48 a         | 1.60 a       |
| 8.6 ppm Fe                               | 11.90       | 9.03 a      | 20.93 a         | 1.34 b       |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente Tukey, 0.05)

Contenido foliar de nutrimentos.

El análisis de varianza para cultivares solo encontró diferencia altamente significativa para Zn y significativa para P, Fe y Mn; no significativa para N, K, Ca, Mg y Cu (Cuadro A12).



En el Cuadro 34 se puede observar que el cultivar Canario 101 presenta mayor contenido de P, Fe y Cu; y menor contenido de Zn y Mn. Y en el Cuadro 35 se observa que el cultivar Canario 101 obtuvo mayores proporciones de Fe:Zn y Fe:Mn.

Índice de desviación al porcentaje óptimo (DPO).

Se determinó el índice de desviación al porcentaje óptimo (DPO). Considerando a los diferentes cultivares en estudio, en general los índices DPO (Cuadro 36) manifiestan que los nutrimentos con contenidos inferiores a la concentración óptima de los cultivares AN-22 y Lagunero 87 fueron el Mn, Zn, Mg y Ca, siendo el Zn y el Mn los nutrimentos con mayor desviación al porcentaje óptimo, y los nutrimentos que se encuentran en exceso fueron P y Cu. El Canario 101 además de los nutrimentos requeridos por los cultivares AN-22 y Lagunero 87 requiere principalmente de Zn, por lo que podríamos considerar que es un cultivar con problemas para la absorción de estos elementos.

Cuadro 34. Comparación de medias para contenido nutrimental del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i).

| Tratamientos    | N<br>% | P<br>%    | K<br>% | Ca<br>%  | Mg<br>%   | Fe<br>ppm  | Cu<br>ppm | Zn<br>ppm | Mn<br>ppm |
|-----------------|--------|-----------|--------|----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| S1 (0.9 ppm Fe) | 4.90 a | 0.760 a   | 3.11 b | 1.80 b c | 0.447 b   | 75.82 c    | 19.82 d   | 98.06 a   | 142.85 a  |
| S2 (1.2 ppm Fe) | 5.32 a | 0.528 b c | 2.53 c | 1.73 c   | 0.528 a   | 186.32 a   | 29.07 c   | 66.63 c   | 97.01 b   |
| S3 (2.4 ppm Fe) | 4.97 a | 0.571 b   | 3.49 a | 2.12 a   | 0.500 a b | 162.70 b   | 36.40 b   | 77.38 b   | 98.11 b   |
| S4 (8.6 ppm Fe) | 5.19 a | 0.476 c   | 3.48 a | 2.01 a b | 0.423 b   | 170.46 a b | 44.44 a   | 61.52 c   | 86.08 b   |
| AN-22           | 5.20 a | 0.554 b   | 3.08 a | 1.93 a   | 0.475 a   | 139.01 b   | 32.28 a   | 82.66 a   | 107.6 a b |
| Canario 101     | 5.18 a | 0.635 a   | 3.12 a | 2.00 a   | 0.479 a   | 159.88 a   | 33.20 a   | 61.30 b   | 99.11 b   |
| Lagunero 87     | 4.91 a | 0.562 a b | 3.26 a | 1.83 a   | 0.470 a   | 147.58 a b | 31.82 a   | 83.73 a   | 111.3 a   |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey 0.05)

Cuadro 35. Comparación de medias para relación del contenido foliar del Fe con otros nutrimentos del experimento relación del hierro con macronutrimentos y micronutrimentos en frijol (ciclo o-i).

| Trat.           | Fe:N   | Fe:P    | Fe:K   | Fe:Ca   | Fe:Mg    | Fe: Cu | Fe:Zn | Fe: Mn |
|-----------------|--------|---------|--------|---------|----------|--------|-------|--------|
| S1 (0.9 ppm Fe) | 15.5 b | 99.8 c  | 24.4 c | 42.1 c  | 169.6 c  | 3.8 b  | 0.8 c | 0.5 c  |
| S2 (1.2 ppm Fe) | 35.0 a | 352.9 a | 73.6 a | 107.7 a | 352.9 ab | 6.4 a  | 2.8 a | 1.9 a  |
| S3 (2.4 ppm Fe) | 32.7 a | 284.9 b | 46.6 b | 76.7 b  | 325.4 b  | 4.5 b  | 2.1 b | 1.7 b  |
| S4 (8.6 ppm Fe) | 32.8 a | 358.1 a | 49.0 b | 84.8 b  | 403.0 a  | 3.8 b  | 2.8 a | 2.0 a  |
| AN-22           | 26.7 a | 250.9 a | 45.1 b | 72.0 a  | 292.7 a  | 4.3 a  | 1.7 b | 1.3 b  |
| Canario 101     | 30.9 a | 251.8 a | 51.2 a | 79.9 a  | 333.8 a  | 4.8 a  | 2.6 a | 1.6 a  |
| Lagunero 87     | 30.1 a | 262.6 a | 45.3 b | 80.6 a  | 314.0 a  | 4.6 a  | 1.8 b | 1.3 b  |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

#### 4.2.2.3 Interacción niveles de Fe y cultivares

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

Para la interacción de niveles de Fe con cultivares el análisis de varianza encontró diferencia altamente significativa para clorosis a los 25 días después del trasplante, días a floración, altura de planta, materia seca y rendimiento de grano por planta.

A los 25 días después del trasplante en la solución nutriente con 0.9 ppm de Fe el cultivar que mayor clorosis presentó fue el Canario 101, y el más resistente fue el AN 22. A los 35 días después del trasplante desaparecieron los síntomas de clorosis férrica.

Contenido foliar de nutrimentos.

En cuanto a la interacción niveles de Fe:cultivar el análisis de varianza encontró diferencia significativa para contenidos foliares de N, y Zn y altamente significativa para Ca. Para los demás elementos no fue significativa.

Cuadro 36. Contenido nutrimental en porcentaje para macronutrientes y en ppm para micronutrientes e índices DOP para los tratamientos del experimento relación del hierro con macronutrientes y micronutrientes en frijol (ciclo o-i)..

| Tratamiento     | N     | P      | K      | Ca     | Mg     | Fe     | Cu     | Zn     | Mn     | Σ IDOP | Requerimientos |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| S1 (0.9 ppm Fe) | 4.9   | 0.760  | 3.11   | 1.80   | 0.45   | 75.8   | 19.8   | 98.01  | 142.8  | 184.0  | Fe>Mg>Mn>N>Zn  |
| ÍNDICE DOP      | -10.9 | 38.18  | -0.64  | -10.0  | -31.23 | -56.67 | 7.14   | -10.85 | -18.4  |        | >Ca >K         |
| NIVEL           | E     | E      | D      | D      | D      | D      | E      | D      | D      |        | Cu>P           |
| S2 (1.2 ppm Fe) | 5.32  | 0.528  | 2.53   | 1.73   | 0.53   | 186.3  | 29.1   | 66.63  | 97.01  | 206.31 | Mn>Zn>K>Mg>Ca  |
| ÍNDICE DOP      | -3.27 | -4.0   | -19.17 | -13.50 | -18.77 | 6.47   | 57.14  | -39.43 | -44.6  |        | >P>N           |
| NIVEL           | D     | D      | D      | D      | D      | E      | E      | D      | D      |        | Fe>Cu          |
| S3 (2.4 ppm Fe) | 4.97  | 0.571  | 3.49   | 2.12   | 0.50   | 162.7  | 36.4   | 77.38  | 98.11  | 231.41 | Mn>Zn>Mg>N>Fe  |
| ÍNDICE DOP      | -9.64 | 3.82   | 11.50  | 6.0    | -23.08 | -7.03  | 96.76  | -29.65 | -43.9  |        |                |
| NIVEL           | D     | E      | E      | E      | D      | D      | E      | D      | D      |        | P>Ca>K>Cu      |
| S4 (8.6 ppm Fe) | 5.19  | 0.475  | 3.48   | 2.01   | 0.42   | 170.5  | 44.4   | 61.52  | 86.08  | 303.39 | Mn>Zn>Mg>P>N>  |
| ÍNDICE DOP      | -5.64 | -13.64 | 11.18  | 0.50   | -34.92 | -2.59  | 140.22 | -44.07 | -50.8  |        | Fe             |
| NIVEL           | D     | D      | E      | O      | D      | D      | E      | D      | D      |        | Ca>K>Cu        |
| AN-22           | 5.20  | 0.554  | 3.08   | 1.93   | 0.48   | 139.01 | 32.3   | 82.66  | 107.60 | 196.62 | Mn>Zn>Mg>Fe>N  |
| ÍNDICE DOP      | -5.45 | 0.73   | -1.60  | -3.5   | -26.92 | -20.57 | 74.49  | -24.85 | -38.5  |        | >Ca>K          |
| NIVEL           | D     | E      | D      | D      | D      | E      | E      | D      | D      |        | P>Cu           |
| CANARIO 101     | 5.18  | 0.635  | 3.12   | 2.00   | 0.48   | 159.9  | 33.2   | 61.30  | 99.11  | 223.64 | Zn>Mn>Mg>Fe>N  |
| ÍNDICE DOP      | -5.82 | 15.45  | -0.32  | 0.0    | -26.31 | -8.64  | 79.46  | -44.27 | -43.4  |        | >K             |
| NIVEL           | D     | E      | D      | O      | D      | D      | E      | D      | D      |        | Ca>P>Cu        |
| LAGUNERO 87     | 4.91  | 0.562  | 3.26   | 1.83   | 0.47   | 147.6  | 31.8   | 83.73  | 111.30 | 201.21 | Mn>Zn>Mg>Fe>N  |
| ÍNDICE DOP      | -10.7 | 2.18   | 4.15   | -8.5   | -27.69 | -15.67 | 72.0   | -23.88 | -36.4  |        | >Ca            |
| NIVEL           | D     | E      | E      | D      | D      | D      | E      | D      | D      |        | P>K>Cu         |

\* DOP = [ ( C \* 100 ) / Cref ] - 100

Donde: DPO.- Desviación del Porcentaje Óptimo.

C.- Concentración del elemento, resultado del análisis foliar.

Cref.- Concentración óptima del nutrimento, propuesto para el cultivo en referencia.

D. Déficit (bajo).

O. Óptimo (suficiente).

E. Exceso (alto).

### **4.2.3 Experimento VI. Efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol en un suelo calcáreo**

La literatura publicada sobre el desarrollo de la clorosis férrica debido al balance nutrimental del hierro con otros elementos dentro de la planta es muy escasa. La aplicación adecuada de fertilizantes incrementa la disponibilidad de los nutrimentos para la planta, por lo tanto, en suelos de baja disponibilidad de hierro los fertilizantes favorecen un balance nutrimental en la planta corrigiendo la clorosis férrica logrando así un incremento en el rendimiento.

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el balance nutrimental de los cultivares de frijol en condiciones de campo, además de observar la respuesta a la aplicación de fertilizantes y quelatos de hierro en el balance nutrimental, corrección de la clorosis férrica y rendimiento del frijol.

#### 4.2.3.1 Cultivares

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

Se utilizó el análisis de varianza para comparar el efecto en los tratamientos. Como se puede observar en el Cuadro A15 se encontró diferencia altamente significativa para clorosis a los 45 días después de la emergencia y rendimiento de grano; diferencia significativa para clorosis a los 15 y 60 días después de la emergencia y producción de biomasa.

Materia seca. La variedad AN-22 mostró mayor rendimiento de materia seca ( $8.22 \text{ g planta}^{-1}$ ) que el Lagunero 87 ( $5.97 \text{ g planta}^{-1}$ ) y el Canario 101 ( $5.29 \text{ g planta}^{-1}$ ).

Rendimiento de grano ( $\text{g planta}^{-1}$ ). En cuanto a rendimiento de grano la variedad de menor producción fue el Canario 101 con  $13.54 \text{ g planta}^{-1}$  y las de mayor rendimiento fueron el AN-22 y el Lagunero 87 con  $28.62$  y  $21.08 \text{ g planta}^{-1}$  respectivamente (Cuadro 37).

#### Clorosis férrica.

La Prueba de los promedios (Tukey) muestra diferencia en la tolerancia a clorosis férrica entre el cultivar AN-22, el cultivar Lagunero 87 y el Canario 101, mostrando la variedad Fe-ineficiente (Canario 101) mayor susceptibilidad a la clorosis férrica, (Cuadro 37).

La clorosis a los 15, 45 y 60 días en general correlaciona con el contenido de clorofila a, la relación clorofila a/b, clorofila total y contenido de Fe, Zn, K y peso de grano por planta. (Cuadro A18). Presentando una correlación negativa con el contenido de clorofila a y clorofila total, lo que indica que a mayor clorosis férrica menor contenido de clorofila a y total. Con el contenido de clorofila b no presenta correlación, por lo anterior la clorosis férrica depende del contenido de clorofila a.

En cuanto a los contenidos de hierro, zinc y potasio se encontró una correlación positiva con respecto a la clorosis férrica, lo cual indica que a mayor grado de clorosis férrica la planta tiende a acumular estos elementos en la hoja, sin poder utilizarlos en su metabolismo, lo anterior se corrobora al aplicar quelatos de hierro a la hoja y no encontrar diferencias significativas con no aplicar.

Cuadro 37. Comparación de medias para la variable clorosis a los 15, 30, 45 y 60 días, biomasa (materia seca) y rendimiento de grano del experimento efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol.

| N              | Tratamiento                                    | Clorosis<br>15 días | Clorosis<br>30 días | Clorosis<br>45 días | Clorosis<br>60 días | Biomasa<br>(g planta <sup>-1</sup> ) | Rnto.<br>(g planta <sup>-1</sup> ) |
|----------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1              | Maxiquel Sue.                                  | 2.9 a               | 2.8 a               | 2.7 a               | 2.7 a               | 6.09 a b                             | 22.12 a                            |
| 2              | Maxiquel Fol.                                  | 3.1 a               | 3.1 a               | 2.9 a               | 3.0 a               | 7.50 a                               | 20.16 b                            |
| 3              | Kelatex Sue.                                   | 2.8 a               | 3.1 a               | 2.9 a               | 3.2 a               | 5.78 b                               | 20.00 b                            |
| 4              | Kelatex Fol.                                   | 2.9 a               | 3.0 a               | 2.8 a               | 3.0 a               | 7.34 a                               | 20.28 b                            |
| 5              | Fe SO <sub>4</sub> Sue.                        | 3.1 a               | 3.0 a               | 2.9 a               | 3.3 a               | 7.77 a                               | 21.14 b                            |
| 6              | Fe SO <sub>4</sub> Fol.                        | 3.2 a               | 3.2 a               | 2.9 a               | 3.1 a               | 6.69 a                               | 22.08 a                            |
| 7              | T. Fertilizado                                 | 3.1 a               | 3.0 a               | 3.1 a               | 3.3 a               | 7.54 a                               | 20.22 b                            |
| 8              | TESTIGO  | 3.1 a               | 3.2 a               | 3.0 a               | 3.5 a               | 5.91 a b                             | 18.58 b                            |
| 9              | NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>                | 3.4 a               | 3.7 a               | 3.4 a               | 3.7 a               | 5.50 b                               | 19.72 b                            |
| 10             | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                | 3.0 a               | 2.9 a               | 2.8 a               | 2.8 a               | 6.09 a b                             | 23.88 a                            |
| 11             | NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 3.1 a               | 3.1 a               | 3.1 a               | 3.3 a               | 4.80 b                               | 23.94 a                            |
| 12             | Ac. Sulfúrico                                  | 3.3 a               | 3.6 a               | 3.4 a               | 3.6 a               | 4.47 b                               | 15.08 c                            |
| 13             | Ac. Fosfórico                                  | 3.0 a               | 3.1 a               | 2.6 a               | 3.2 a               | 7.38 a                               | 25.12 a                            |
| 14             | Humi-K Sue.                                    | 3.2 a               | 3.4 a               | 3.3 a               | 3.5 a               | 7.30 a                               | 20.08 b                            |
| 15             | U.A. + A.F.                                    | 3.2 a               | 3.1 a               | 2.9 a               | 3.1 a               | 7.19 a                               | 23.40 a                            |
| V <sub>1</sub> | AN-22  | 2.8 b               | 3.0 b               | 2.8 b               | 2.6 c               | 8.22 a                               | 28.62 a                            |
| V <sub>2</sub> | Canario 101                                    | 3.5 a               | 3.9 a               | 3.8 a               | 3.9 a               | 5.29 c                               | 13.54 c                            |
| V <sub>3</sub> | Lagunero 87                                    | 3.0 b               | 2.6 c               | 2.4 c               | 3.2 b               | 5.97 b                               | 21.08 b                            |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

#### Contenido de Clorofila.

El análisis de varianza muestra solo diferencia significativa para los cultivares en los contenidos de clorofila a (Cuadro 38). La prueba de medias (Tukey) muestra que el cultivar Canario 101 es el que contiene menor cantidad de clorofila a (2.28 mg L<sup>-1</sup>), al igual que la cantidad de clorofila b (1.83 mg L<sup>-1</sup>), total (4.11 mg L<sup>-1</sup>) y menor relación a/b (1.57) en la planta, que las otras variedades (Cuadro 39). Las variedades de frijol AN-22 y Lagunero 87 presentaron contenidos similares de clorofila a, b y total, siendo en ambos cultivares mayores los contenidos de clorofila a que la clorofila b, característica importante debido a que la clorofila a interviene más determinadamente en la fotosíntesis.



Cuadro 38. Cuadrados medios de las variables clorofila a, clorofila b, clorofila total y la relación clorofila a/b del experimento efecto de los fertilizantes en el balance nutricional y corrección de la clorosis férrica del frijol.

| F.V.          | gl | Clorofila a | Clorofila b | Clorofila total<br>(a+b) | Relación a/b |
|---------------|----|-------------|-------------|--------------------------|--------------|
| Repeticiones  | 2  | 2.505 NS    | 31.122 NS   | 37.861 NS                | 16.754 NS    |
| Cultivares    | 2  | 43.244 *    | 4.139.NS    | 69.727 NS                | 4.087 NS     |
| Error A       | 4  | 3.050       | 5.73235     | 14.122324                | 3.937291     |
| Fertilizantes | 14 | 0.742.NS    | 0.3549.NS   | 1.894 NS                 | 0.075 NS     |
| Error B       | 28 | 0.572118    | 0.3677118   | 1.229975                 | 0.2064887    |
| Interraccion  | 28 | 0.5067 NS   | 0.494 NS    | 1.426 NS                 | 0.156 NS     |
| Error C       | 56 | 0.4473423   | 0.5818475   | 1.677277                 | 0.137426     |
| C.V %         |    | 19.6        | 35.9        | 23.39                    | 19.65        |

NS. No hay diferencia significativa entre los tratamientos.

\*. Existe diferencia significativa entre los tratamientos (95 %)

\*\* Existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos (99 %).

Los contenidos de clorofila a correlacionan con el contenido de clorofila total, clorofila b y la relación de clorofila a/b, la clorosis a los 15, 40 y 60 días, el contenido de Fe, K, Ca y Mn, contenido de materia seca y peso de grano (Cuadro A18). Los contenidos de clorofila b no correlacionaron con los grados de clorosis ni con el contenido de Fe en la planta. De acuerdo a lo anterior el contenido de clorofila a, determina el grado de clorosis férrica. Es importante destacar que existe una correlación negativa lo que indica que a mayor contenido de clorofila a menor grado de clorosis férrica, por el contrario a mayor contenido de clorofila a menor contenido de Fe.

Los altos contenidos de Fe en las hojas mostrando clorosis férrica indica que el hierro no interviene en el metabolismo de la planta aunque esté presente, indicando que los cultivares fueron capaces de absorber Fe, aunque los cultivares AN-22 y el Lagunero 87 al tener mayores contenidos de clorofila a y total metabolizan más hierro que el cultivar canario 101. La producción de grano y el incremento de materia seca es reportado por Morris (1990), quien encontró que el peso seco de la planta de soya cultivada en suelos calcáreos, correlacionó con el Fe total, señalando que los cultivos producen más materia seca al tener mayor disponibilidad de hierro.

Contenido foliar de nutrimentos.

Para el contenido de nutrimentos de los diferentes cultivares en estudio el análisis de varianza encontró diferencia significativa para Fe y Cu (Cuadro A16). Y, diferencia no significativa para los demás elementos nutrimentos analizados.

En cuanto a los genotipos utilizados no se encontró diferencia significativa en el contenido de N, P, K, Ca y Mg (Cuadro 40). En cuanto al hierro el cultivar con mayor contenido fue el Canario 101 con 205.3 ppm superando al Lagunero 87 (138.6 ppm) y al AN-22 (80.3 ppm). En general el cultivar Canario 101 presentó mayores contenidos de P, K, Ca, Mg, Fe, Zn y Mn que los cultivares AN-22 y el Lagunero 87. Esto permite determinar que el cultivar Fe-ineficiente Canario 101 si absorbe el Fe del suelo, pero al mostrar menor contenido de clorofila a y mayor grado de clorosis férrica indica que no lo utiliza en el su metabolismo.

En general los contenidos de Fe total en las plantas se consideran como normales de acuerdo a Benton (1983) quien señala el rango de 50 a 250 ppm como suficiente, indicando que no se conoce el contenido que cause toxicidad en la planta

Índice de desviación al porcentaje óptimo.

Considerando los cultivares en estudio, en general los índices DPO (desviación al porcentaje óptimo) (Cuadro 42) manifiestan que el orden de requerimientos para los nutrimentos con deficiencia es  $Zn > Mn > P > N > Fe$ , siendo el Zn, Mn, P y N los nutrimentos con mayor desviación al porcentaje óptimo. Y, para los nutrimentos que se encuentran por arriba del porcentaje óptimo el orden de requerimientos es  $K > Ca > Mg > Cu$ . El cultivar Canario101 (205.3 ppm) presentó un contenido de hierro por arriba del porcentaje óptimo (175 ppm) a diferencia del Lagunero 87 (138.6 ppm) y del AN-22 (80.3 ppm) que tuvieron un menor contenido de hierro.

El contenido bajo de Zn y Mn se debe a que no se encuentran disponibles para la planta, ya que según menciona Lindsay (1984), para que el elemento este disponible se debe encontrar en condiciones de reducción para así aumentar los niveles de  $Mn^{+2}$  en solución, al reducirse el  $Mn^{+4}$  precipitado en forma de óxidos. En este caso no hubo condiciones reductoras. Además el  $Fe^{+2}$  es el principal competidor del  $Mn^{+2}$  por las localizaciones metabólicas según lo mencionan Mengel and Kirby (1982).

Aunque el Cu presenta mayor capacidad que el Mn para inducir clorosis férrica (Wallace y Dekock, 1966) los contenidos de Cu encontrados en los cultivares (elemento con mayor contenido considerando el porcentaje óptimo), no interfirió en la absorción del Fe por la planta, ya que sus contenidos se encuentran en el rango de suficiencia considerado por Benton (1983). Pero si se encontró una tendencia de a mayor contenido de Cu en las hojas menor contenido de Mn, Zn y Fe sin presentar una correlación significativa (Cuadro A18).

A pesar de que el Mn se encuentra en el suelo en altas cantidades (32.4 ppm) (Cuadro 11) y el Fe y Zn en cantidades muy pobres (2.4 y 0.3 ppm, respectivamente) parece ser que la capacidad de acidificación de la rizósfera por los cultivares incrementa el Fe disponible acumulándolo en sus tejidos, existiendo la posibilidad de que los cultivares tengan cierta selectividad de absorber  $Fe^{+2}$  en lugar de  $Mn^{+2}$ .

Al encontrar que el Zn es el elemento más requerido por la planta se podría pensar que es el elemento causante de la clorosis presentada por los cultivares. El Zn al igual que el Fe presentó correlación positiva con los diferentes grados de clorosis, además con el contenido de P y Fe; y correlación negativa con biomasa y peso de grano. Por lo anterior se puede deducir que las plantas con clorosis tienden a incrementar el contenido de Zn en las hojas, pero los contenidos de Zn no correlacionan con los contenidos de clorofila a y total, que influyen fuertemente en el grado de clorosis de las plantas (Cuadro A18). No se ha encontrado la participación directa del Zn en las reacciones de fotosíntesis, como se ha establecido para Mn, Cu y Fe, pero participa en la formación de los predecesores de la clorofila. Se ha descubierto Zn-protoporfirina que

puede ser la precursora de las ferroporfirinas y es posible que también de la porfirina magnésica. Los contenidos de Zn en los diferentes cultivares estudiados se consideran adecuados en relación a los reportados por Baker and Cihacek (1983), quienes indican como rango óptimo de 30 a 50 ppm, y Jones *et al.* (1991) entre 20 y 200 ppm. Considerando el rango reportado por Jones *et al.* el contenido de Zn es ligeramente bajo, por lo que el pH alcalino del suelo podría interferir en la absorción de este elemento. La menor producción de biomasa correlaciona con el menor contenido de Zn, de acuerdo con Baker and Cihacek (1983) mencionan que el Zn es necesario para formar ciertas hormonas de crecimiento y se requiere para la síntesis de proteínas, altura de planta y formación de grano.

#### 4.2.3.2 Fertilizantes.

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

Por aplicación de fertilizantes el análisis de varianza encontró diferencia altamente significativa para producción de biomasa y rendimiento de grano y diferencia no significativa para clorosis férrica.

Materia seca. La prueba de medias para fertilizantes y quelatos conforma dos grupos diferentes siendo los tratamientos superiores al testigo sin fertilizar (5.91 g planta<sup>-1</sup>) el Maxiquel al suelo (6.09 g planta<sup>-1</sup>), Maxiquel foliar (7.50 g planta<sup>-1</sup>), Kelatex foliar (7.34 g planta<sup>-1</sup>), FeSO<sub>4</sub> Suelo (7.77 g planta<sup>-1</sup>), FeSO<sub>4</sub> Foliar (6.69 g planta<sup>-1</sup>), Testigo Fertilizado (7.54 g planta<sup>-1</sup>), NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (6.09 g planta<sup>-1</sup>), Ácido Fosfórico (7.38 g planta<sup>-1</sup>), Humi-K al suelo (7.30 g planta<sup>-1</sup>) y la fertilización U.A. + A.F. (7.19 g planta<sup>-1</sup>). La menor producción de biomasa del testigo sin fertilizar, del fosfato de amonio y del ácido sulfúrico, se puede deber a la menor disponibilidad del Fe ya que no se le aportaron y el suelo es deficiente en Fe disponible para el cultivo. Los tratamientos con fertilizante sin hierro, que superaron al testigo (Cuadro 37) podrían deberse a la disminución del pH dejando disponible una mayor cantidad de hierro aunque no se incrementó el contenido de clorofila en las hojas.

La producción de materia seca correlacionó con peso de grano, clorosis férrica a los 60 días, contenido de Fe, P, Cu, Zn y clorofila a y total (Cuadro A18). Presenta una correlación positiva con los contenidos de clorofila a y total, indicando que a mayor contenido de clorofila a y total se incrementa la producción de materia seca y por lo tanto mayor producción de grano. La correlación negativa con Clorosis, Fe, P y Zn indica que las plantas con clorosis férrica incrementan sus contenidos de Fe, P y Zn en las hojas, pero sin ser utilizados en el metabolismo de la planta por lo cual disminuye la producción de clorofila a causando una disminución en la eficiencia fotosintética por lo que disminuye la producción de biomasa. Lo anterior podría señalar que los fertilizantes de reacción ácida no influyeron en el pH del suelo pero los cultivares tuvieron la capacidad de disminuir el pH de la rizósfera incrementando la cantidad de Fe, P y Zn disponible.

Rendimiento de grano. Los fertilizantes y quelatos de Fe utilizados no controlaron la clorosis férrica pero incrementaron el rendimiento, conformándose tres grupos diferentes, sobresaliendo los tratamientos: Maxiquel al suelo (22.12 g por planta), Fe SO<sub>4</sub> foliar (22.08), U.A. + A.F. (23.40), NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (23.88), NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (23.94) y el Ac. Fosfórico con 25.12 g por planta. Y, el de menor rendimiento fue el Ac. Sulfúrico con 15.08 g por planta.

El peso de grano manifiesta correlación positiva con la producción de materia seca y el contenido de clorofila a y total, y correlación negativa con los contenidos de Fe, Cu, Zn, Mn, P y K y clorosis férrica (Cuadro A18). Esto indica que la clorosis férrica afecta directamente el rendimiento y los contenidos de Fe y P en hojas no incrementan el rendimiento debido a que no está metabolizable.

Comparando la producción de materia seca y de grano entre los cultivares AN-22 y el Lagunero 87, se puede concluir que aunque ambos son de crecimiento indeterminado, tipo II, el Cultivar AN-22 fue más eficiente en metabolizar el Fe y obtener mayor contenido de clorofila a y por lo tanto mayor eficiencia fotosintética.

Es importante resaltar que los rendimientos obtenidos al aplicar Fe en forma foliar son estadísticamente iguales a los tratamientos que implican la aplicación de ácidos al suelo. Esto permite eliminar los efectos perjudiciales que ocasiona la aplicación de ácidos al suelo como es la rápida oxidación de la materia orgánica y el potencial incremento de la salinidad del suelo.

#### Contenido de Clorofila.

El análisis de varianza para la aplicación de fertilizantes no encontró diferencia significativa.

Aunque de acuerdo al análisis estadístico, los tratamientos con fertilización no causaron un incremento en el contenido de clorofila en las hojas, es notable el efecto de la urea ácida y el uso de ácido fosfórico en su efecto en la concentración de clorofila a, clorofila total y la relación clorofila a:b, debido a los efectos acidificantes inmediatos (Stromberg y Tisdale, 1979), la solubilidad del Fe y otros metales se incrementa, pudiendo ser absorbidos por la planta, por lo que la planta puede efectuar mejor la fotosíntesis, además de la posible liberación de Ca y Mg de los suelos calcáreos, que al ser absorbidos por la planta pueden formar parte de la molécula de clorofila.

#### Contenido foliar de nutrimentos.

En cuanto a los diferentes fertilizantes y quelatos aplicados el análisis de varianza encontró diferencia altamente significativa solo para Fe siendo no significativa para los demás nutrimentos (Cuadro A16).

Cuadro 39. Comparación de medias para contenidos de clorofila a, b, a+b y la relación a/b del experimento efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol.

| No             | Tratamiento                                    | Clorofila a<br>mg L <sup>-1</sup> | Clorofila b<br>mg L <sup>-1</sup> | Clorofila total<br>mg L <sup>-1</sup> | Relación a/b |
|----------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| 1              | Maxiquel Sue.                                  | 3.39 a                            | 2.11 a                            | 5.50 a                                | 1.89 a       |
| 2              | Maxiquel Fol.                                  | 3.19 a                            | 1.70 a                            | 4.89 a                                | 2.06 a       |
| 3              | Kelatex Sue.                                   | 3.53 a                            | 2.10 a                            | 5.63 a                                | 1.92 a       |
| 4              | Kelatex Fol.                                   | 3.46 a                            | 1.96 a                            | 5.43 a                                | 1.90 a       |
| 5              | Fe SO <sub>4</sub> Sue.                        | 4.09 a                            | 2.49 a                            | 6.58 a                                | 1.89 a       |
| 6              | Fe SO <sub>4</sub> Fol.                        | 3.29 a                            | 2.06 a                            | 5.35 a                                | 1.87 a       |
| 7              | T. Fertilizado                                 | 3.56 a                            | 2.37 a                            | 5.93 a                                | 1.74 a       |
| 8              | TESTIGO  | 3.54 a                            | 2.24 a                            | 5.79 a                                | 1.82 a       |
| 9              | NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>                | 2.96 a                            | 1.89 a                            | 4.86 a                                | 1.75 a       |
| 10             | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                | 3.58 a                            | 2.13 a                            | 5.70 a                                | 1.99 a       |
| 11             | NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 3.09 a                            | 2.08 a                            | 5.18 a                                | 1.89 a       |
| 12             | Ac. Sulfúrico                                  | 3.13 a                            | 2.11 a                            | 5.24 a                                | 1.83 a       |
| 13             | Ac. Fosfórico                                  | 3.61 a                            | 2.34 a                            | 5.95 a                                | 1.86 a       |
| 14             | Humi-K Sue.                                    | 3.12 a                            | 2.00 a                            | 5.13 a                                | 1.85 a       |
| 15             | U.A. + A.F.                                    | 3.61 a                            | 2.26 a                            | 5.87 a                                | 2.04 a       |
| V <sub>1</sub> | AN-22  | 3.98 a                            | 2.44 a                            | 6.42 a                                | 1.93 b       |
| V <sub>2</sub> | Canario 101                                    | 2.28 b                            | 1.83 b                            | 4.11 b                                | 1.57 c       |
| V <sub>3</sub> | Lagunero 87                                    | 3.97 a                            | 2.10 a b                          | 6.07 a                                | 2.16 a       |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

La aplicación de fertilizantes y quelatos al suelo y planta no afectaron el contenido nutrimental de las plantas de frijol, pero sí el contenido de Fe (Cuadro 40). La prueba de medias (Tukey) para contenido de hierro en las hojas forma dos grupos diferentes, siendo los tratamientos con un contenido de hierro mayor que el Testigo Fertilizado (147.6 ppm) los siguientes FeSO<sub>4</sub> Foliar (182.3 ppm), Ac. Sulfúrico Suelo (164.1 ppm), NH<sub>4</sub>SO<sub>4</sub> Suelo (159.6 ppm), Kelatex Foliar (153.4 ppm), Maxiquel al Suelo (151.0 ppm) y Maxiquel Foliar (149.5 ppm). Es importante considerar que la utilización de fertilizantes ácidos como la urea ácida, ácido fosfórico, adicionándose además de quelatos, se elimina el efecto dañino de los ácidos como el sulfúrico al aplicarse al suelo, como es la rápida degradación de la materia orgánica del suelo y su manejo en la aplicación.

Los fertilizantes de reacción ácida no incrementaron el contenido de Fe y P disponible para la planta no concordando con Ryan y Stroehlein (1973), que mencionan que la acidificación de los suelos incrementa el crecimiento y la absorción de P en el cultivo del tomate, sugiriendo que ésta técnica es adecuada para incrementar la disponibilidad de fosfatos en suelos alcalinos y calcáreos. La falta de respuesta podría ser debido a la concentración aplicada o a la metodología utilizada en la aplicación del ácido.

Considerando los índices DPO (desviación al porcentaje óptimo), con la aplicación de fertilizantes y quelatos al suelo y planta en general para los nutrimentos por debajo del contenido óptimo el orden de requerimientos es  $Zn > Mn > P > Fe > N$  (Cuadro 41), siendo los elementos con mayor desbalance el Zn, Mn y P. Los nutrimentos que se encontraron por arriba del porcentaje óptimo fueron el K, Ca, Mg y Cu. Los tratamientos con menor desbalance del hierro fueron el  $FeSO_4$  Foliar (182.3 ppm), ácido sulfúrico al suelo (164.1 ppm) y el  $NH_4SO_4$  (159.6 ppm) con índices DPO de 4.2, -6.2 y -8.8 respectivamente.



Cuadro 41. Comparación de medias para contenido nutrimental del experimento efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol.

| Tratamiento  | N %    | P %      | K %    | Ca %   | Mg %      | Fe ppm    | Cu ppm | Zn ppm | Mn ppm  |
|--|--------|----------|--------|--------|-----------|-----------|--------|--------|---------|
| 1. Maxiquel Sue.                                   | 4.63 a | 0.457 a  | 3.39 a | 2.40 a | 0.849 a   | 151.0 a b | 31.5 a | 41.7 a | 124.4 a |
| 2. Maxiquel Fol.                                   | 4.64 a | 0.424 a  | 3.36 a | 2.38 a | 0.820 a   | 149.5 a b | 31.5 a | 50.0 a | 117.1 a |
| 3. Kelatex Sue.                                    | 5.02 a | 0.458 a  | 3.50 a | 2.30 a | 0.846 a   | 113.9 b   | 29.0 a | 51.4 a | 125.9 a |
| 4. Kelatex Fol.                                    | 4.91 a | 0.434 a  | 3.64 a | 2.37 a | 0.871 a   | 153.4 a b | 29.0 a | 50.6 a | 127.5 a |
| 5. Fe SO <sub>4</sub> Sue.                         | 4.49 a | 0.436 a  | 3.44 a | 2.32 a | 0.778 a   | 129.6 b   | 28.4 a | 51.5 a | 125.3 a |
| 6. Fe SO <sub>4</sub> Fol.                         | 4.64 a | 0.441 a  | 3.36 a | 2.44 a | 0.812 a   | 182.3 a   | 29.7 a | 50.0 a | 128.4 a |
| 7. T. Fertilizado                                  | 4.79 a | 0.391 a  | 3.57 a | 2.38 a | 0.781 a   | 147.6 a b | 29.7 a | 50.0 a | 125.7 a |
| 8. Testigo   | 4.48 a | 0.420 a  | 3.63 a | 2.42 a | 0.813 a   | 132.6 b   | 29.7 a | 57.5 a | 115.0 a |
| 9. NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>                 | 4.77 a | 0.416 a  | 3.67 a | 2.39 a | 0.856 a   | 159.6 a   | 27.2 a | 56.9 a | 121.9 a |
| 10. NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                | 4.94 a | 0.443 a  | 3.33 a | 2.26 a | 0.719 a   | 106.5 b   | 29.1 a | 50.6 a | 111.2 a |
| 11. NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 4.86 a | 0.422 a  | 3.63 a | 2.37 a | 0.832 a   | 139.2 a b | 27.8 a | 52.0 a | 110.4 a |
| 12. Ac. Sulfúrico                                  | 4.79 a | 0.432 a  | 3.22 a | 2.33 a | 0.794 a   | 164.1 a   | 28.4 a | 52.6 a | 114.6 a |
| 13. Ac. Fosfórico                                  | 4.93 a | 0.419 a  | 3.53 a | 2.43 a | 0.876 a   | 113.3 b   | 27.8 a | 53.2 a | 121.3 a |
| 14. Humi-K Sue.                                    | 4.56 a | 0.416 a  | 3.20 a | 2.33 a | 0.787 a   | 136.8 a b | 27.2 a | 52.9 a | 118.4 a |
| 15. U.A. + A.F.                                    | 4.89 a | 0.408 a  | 3.20 a | 2.32 a | 0.772 a   | 141.6 a b | 29.1 a | 50.9 a | 117.3 a |
| V <sub>1</sub> AN-22                               | 4.74 a | 0.414 b  | 3.39 b | 2.29 b | 0.772 b   | 80.3 c    | 34.6 a | 43.2 b | 110.5 b |
| V <sub>2</sub> Canario 101                         | 4.71 a | 0.440 a  | 3.83 a | 2.40 a | 0.820 a b | 205.3 a   | 29.5 b | 55.4 a | 133.3 a |
| V <sub>3</sub> Lagunero 87                         | 4.82 a | 0.422 ab | 3.12 c | 2.39 a | 0.849 a   | 138.6 b   | 22.9 c | 55.8 a | 117.1 b |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

Cuadro 42. Comparación de medias para relación del contenido foliar del Fe con otros nutrientes del experimento efecto de los fertilizantes en el balance nutricional y corrección de la clorosis férrica del frijol.

| Tratamiento  | Fe:N    | Fe:P     | Fe:K    | Fe:Ca   | Fe:Mg    | Fe: Cu | Fe:Zn  | Fe: Mn |
|--|---------|----------|---------|---------|----------|--------|--------|--------|
| 1. Maxiquel Sue.                                   | 32.6 ab | 330.4 ab | 44.5 ab | 62.9 ab | 177.9 ab | 4.8 ab | 3.6 a  | 1.26 a |
| 2. Maxiquel Fol.                                   | 32.2 ab | 352.6 ab | 44.5 ab | 62.8 ab | 182.3 ab | 4.7 ab | 3.0 ab | 1.30 a |
| 3. Kelatex Sue.                                    | 22.7 b  | 248.7 b  | 32.5 b  | 49.5 b  | 134.6 b  | 3.9 ab | 2.2 ab | 0.93 a |
| 4. Kelatex Fol.                                    | 31.2 ab | 353.5 a  | 42.1 ab | 64.7 ab | 176.1 ab | 5.3 ab | 3.0 ab | 1.23 a |
| 5. Fe SO <sub>4</sub> Sue.                         | 28.9 ab | 297.2 b  | 37.7 ab | 55.9 ab | 166.6 ab | 4.6 ab | 2.5 ab | 1.06 a |
| 6. Fe SO <sub>4</sub> Fol.                         | 39.3 a  | 413.4 a  | 54.3 a  | 74.7 a  | 224.5 a  | 6.1 a  | 3.6 a  | 1.40 a |
| 7. T. Fertilizado                                  | 30.8 ab | 377.5 a  | 41.3 ab | 62.0 ab | 189.0 ab | 5.0 ab | 3.0 ab | 1.20 a |
| 8. Testigo   | 29.6 ab | 315.7 b  | 36.5 b  | 54.8 ab | 163.1 ab | 4.5 ab | 2.3 ab | 1.25 a |
| 9. NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>                 | 33.5 ab | 383.7 a  | 43.5 ab | 66.8 ab | 186.4 ab | 5.9 a  | 2.8 ab | 1.30 a |
| 10. NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                | 21.6 b  | 240.4 b  | 32.0 b  | 47.1 b  | 148.1 b  | 3.7 b  | 2.1 b  | 1.05 a |
| 11. NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 28.6 ab | 329.9 b  | 38.3 ab | 58.7 ab | 167.3 ab | 5.0 ab | 2.7 ab | 1.35 a |
| 12. Ac. Sulfúrico                                  | 34.3 ab | 379.9 a  | 51.0 a  | 70.4 a  | 206.7 a  | 5.8 ab | 3.1 ab | 1.40 a |
| 13. Ac. Fosfórico                                  | 23.0 b  | 270.4 b  | 32.1 b  | 46.6 b  | 129.3 b  | 4.1 ab | 2.1 b  | 0.94 a |
| 14. Humi-K Sue.                                    | 30.0 ab | 328.8 ab | 42.8 ab | 58.7 ab | 173.8 ab | 5.0 ab | 2.6 ab | 1.18 a |
| 15. U.A. + A.F.                                    | 29.0 ab | 347.1 ab | 44.3 ab | 61.0 ab | 183.4 ab | 4.9 ab | 2.8 ab | 1.25 a |
| V <sub>1</sub> AN-22                               | 16.9 c  | 194.0 c  | 23.7 c  | 35.1 c  | 104.0 c  | 2.3 b  | 1.9 c  | 0.70 c |
| V <sub>2</sub> Canario 101                         | 43.60 a | 466.6 a  | 53.6 a  | 85.5 a  | 250.4 a  | 7.0 a  | 3.7 a  | 1.50 a |
| V <sub>3</sub> Lagunero 87                         | 28.8 b  | 328.4 b  | 44.4 b  | 58.0 b  | 163.3 b  | 6.1 a  | 2.5 b  | 1.20 b |

\* Medias con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey, 0.05)

#### 4.2.3.3 Interacción cultivares Vs fertilizantes.

Rendimiento de grano y otros factores fisiológicos.

En la interacción Cultivar-Fertilizante se encontró diferencia altamente significativa para producción de biomasa y rendimiento de grano.

El contenido de Fe correlacionó en forma positiva con clorosis férrica y contenidos de Ca, K, P, Mg y Zn y negativamente con contenidos de clorofila a, total, biomasa y rendimiento de grano (Cuadro A22). Lo anterior se explica debido a que los cultivares con clorosis férrica tienden a absorber más hierro por lo que se incrementa el contenido en las hojas pero este no es utilizado en el metabolismo disminuyendo la síntesis de clorofila a y total en las hojas repercutiendo en un incremento de la clorosis férrica. Morris (1990) encontró una correlación alta entre la producción de biomasa en soya con el Fe total de la misma, señalando que la planta produce más materia seca con mayor cantidad de hierro.

Contenido foliar de nutrimentos.

En cuanto a los diferentes fertilizantes y quelatos aplicados el análisis de varianza encontró en la interacción cultivares-fertilizantes diferencia altamente significativa solo para Fe siendo no significativa para los demás nutrimentos (Cuadro A16).

Cuadro 43. Contenido nutrimental en porcentaje para macronutrientes y ppm para micronutrientes e índices DOP para los tratamientos del experimento efecto de los fertilizantes en el balance nutrimental y corrección de la clorosis férrica del frijol.

| Tratamiento                                       | N                   | P                    | K                  | Ca                | Mg                  | Fe                  | Cu                | Zn                 | Mn                  | Σ IDOP | Requerimientos                  |
|---|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------|---------------------------------|
| 1. Maxiquel Sue.<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL           | 4.63<br>-15.82<br>D | 0.457<br>-16.91<br>D | 3.39<br>8.31<br>E  | 2.40<br>20.0<br>E | 0.849<br>30.62<br>E | 151.0<br>-13.7<br>D | 31.5<br>70.3<br>E | 41.7<br>-62.1<br>D | 124.4<br>-28.9<br>D | 266.6  | Zn>Mn>P>N>Fe><br>K>Ca>Mg>Cu     |
| 2. Maxiquel Fol.<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL           | 4.64<br>-15.6<br>D  | 0.424<br>-22.91<br>D | 3.36<br>7.35<br>E  | 2.38<br>19.0<br>E | 0.820<br>26.15<br>E | 149.5<br>-14.6<br>D | 31.5<br>70.3<br>E | 50.0<br>-54.5<br>D | 117.1<br>-33.1<br>D | 263.5  | Zn>Mn>P>N>Fe><br>K>Ca>Mg>Cu     |
| 3. Kelatex Sue.<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL            | 5.02<br>-8.73<br>D  | 0.458<br>-16.73<br>D | 3.50<br>11.82<br>E | 2.30<br>15.0<br>E | 0.846<br>30.15<br>E | 113.9<br>-34.9<br>D | 29.0<br>56.8<br>E | 51.4<br>-53.3<br>D | 125.9<br>-28.1<br>D | 255.4  | Zn>Fe>Mn>P>N><br>K>Ca>Mg>Cu     |
| 4. Kelatex Fol.<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL            | 4.91<br>-10.73<br>D | 0.434<br>-21.09<br>D | 3.64<br>16.29<br>E | 2.37<br>18.5<br>E | 0.871<br>34.0<br>E  | 153.4<br>-12.3<br>D | 29.0<br>56.8<br>E | 50.6<br>-54.0<br>D | 127.5<br>-27.1<br>D | 250.9  | Zn>Mn>Fe>N><br>K>Ca>P>Mg>Cu     |
| 5. Fe SO <sub>4</sub> Sue.<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL | 4.49<br>-18.36<br>D | 0.436<br>-20.73<br>D | 3.44<br>9.90<br>E  | 2.32<br>16.0<br>E | 0.778<br>19.69<br>E | 129.6<br>-25.9<br>D | 28.4<br>53.5<br>E | 51.5<br>-53.2<br>D | 125.3<br>-28.4<br>D | 245.7  | Zn>Mn<br>>Fe>P>N><br>K>Ca>Mg>Cu |
| 6. Fe SO <sub>4</sub> Fol.<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL | 4.64<br>-15.64<br>D | 0.441<br>-19.82<br>D | 3.36<br>7.35<br>E  | 2.44<br>22.0<br>E | 0.812<br>24.92<br>E | 182.3<br>4.2<br>E   | 29.7<br>60.5<br>E | 50.0<br>-54.5<br>D | 128.4<br>-26.6<br>D | 235.6  | Zn>Mn>P>N><br>Fe>K>Ca>Mg>Cu     |
| 7. T. Fertilizado<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL          | 4.79<br>-12.91<br>D | 0.391<br>-28.91<br>D | 3.57<br>14.06<br>E | 2.38<br>19.0<br>E | 0.781<br>20.15<br>E | 147.6<br>-15.7<br>D | 29.7<br>60.5<br>E | 50.0<br>-54.5<br>D | 125.7<br>-28.2<br>D | 253.9  | Zn>Mn>P>Fe>N><br>K>Ca>Mg>Cu     |
| 8. TESTIGO<br>ÍNDICE DOP<br>NIVEL                 | 4.48<br>-18.55<br>D | 0.420<br>-23.64<br>D | 3.63<br>15.97<br>E | 2.42<br>21.0<br>E | 0.813<br>25.08<br>E | 132.6<br>-24.2<br>D | 29.7<br>60.5<br>E | 57.5<br>-47.7<br>D | 115.0<br>-34.3<br>D | 271.0  | Zn>Mn>Fe>P>N><br>K>Ca>Mg>Cu     |

\* DOP = [ ( C \* 100 ) / Cref ] - 100

Donde: DPO.- Desviación del Porcentaje Óptimo.

C.- Concentración del elemento, resultado del análisis foliar.

Cref.- Concentración óptima del nutriente, propuesto para el cultivo en referencia.

D. Déficit (bajo).

O. Óptimo (suficiente).

E. Exceso (alto).

Cuadro Continuación...

| Tratamiento  | N      | P      | K     | Ca   | Mg    | Fe    | Cu   | Zn    | Mn    | Σ IDOP | Requerimientos |
|--|--------|--------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|--------|----------------|
| 9. NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>                 | 4.77   | 0.416  | 3.67  | 2.39 | 0.856 | 159.6 | 27.2 | 56.9  | 121.9 | 240.5  | Zn>Mn>P>N>Fe>  |
| ÍNDICE DOP   | -13.27 | -24.36 | 17.25 | 19.5 | 31.69 | -8.8  | 47.0 | -48.3 | -30.3 |        | K>Ca>Mg>Cu     |
| NIVEL  | D      | D      | E     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        |                |
| 10. NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                | 4.94   | 0.443  | 3.33  | 2.26 | 0.719 | 106.5 | 29.1 | 50.6  | 111.2 | 246.5  | Zn>Fe>Mn>P>    |
| ÍNDICE DOP   | -10.18 | -19.45 | 6.39  | 13.0 | 10.62 | -39.1 | 57.3 | -54.0 | -36.5 |        | N>             |
| NIVEL  | D      | D      | E     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        | K>Mg>Ca> Cu    |
| 11. NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 4.86   | 0.422  | 3.63  | 2.37 | 0.832 | 139.2 | 27.8 | 52.0  | 110.4 | 257.8  | Zn>Mn>P>Fe>N>  |
| ÍNDICE DOP   | -11.64 | -23.27 | 15.97 | 18.5 | 28.0  | -20.5 | 50.3 | -52.7 | -36.9 |        | K>Ca>Mg>Cu     |
| NIVEL  | D      | D      | E     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        |                |
| 12. Ac. Sulf.                                      | 4.79   | 0.432  | 3.22  | 2.33 | 0.794 | 164.1 | 28.4 | 52.6  | 114.6 | 222.3  | Zn>Mn>P>N>Fe>  |
| ÍNDICE DOP   | -12.91 | -21.45 | 2.88  | 16.6 | 22.15 | -6.2  | 53.5 | -52.2 | -34.5 |        | K>Ca>Mg>Cu     |
| NIVEL  | D      | D      | E     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        |                |
| 13. Ac. Fosf.                                      | 4.93   | 0.419  | 3.53  | 2.43 | 0.876 | 113.3 | 27.8 | 53.2  | 121.3 | 271.1  | Zn>Fe>Mn>P>N>  |
| ÍNDICE DOP   | -10.36 | -23.82 | 12.78 | 21.5 | 34.77 | -35.3 | 50.3 | -51.6 | -30.7 |        | K>Ca>Mg>Cu     |
| NIVEL  | D      | D      | E     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        |                |
| 14. Humi-K<br>Sue.                                 | 4.56   | 0.416  | 3.20  | 2.33 | 0.787 | 136.8 | 27.2 | 52.9  | 118.4 | 234.6  | Zn>Mn>P>Fe>N>  |
| ÍNDICE DOP   | -17.04 | -24.36 | 2.24  | 16.5 | 21.08 | -21.8 | 47.0 | -51.9 | -32.3 |        | K>Ca>Mg>Cu     |
| NIVEL  | D      | D      | E     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        |                |
| 15. U.A. + A.F.                                    | 4.89   | 0.408  | 3.20  | 2.32 | 0.772 | 141.6 | 29.1 | 50.9  | 117.3 | 236.9  | Zn>Mn>P>Fe>N>  |
| ÍNDICE DOP   | -11.09 | -25.82 | 2.24  | 16.0 | 18.77 | -19.1 | 57.3 | -53.7 | -32.9 |        | K>Ca>Mg>Cu     |
| NIVEL  | D      | D      | E     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        |                |

\* DOP = [ ( C \* 100 ) / Cref ] - 100

Donde: DPO.- Desviación del Porcentaje Óptimo.

C.- Concentración del elemento, resultado del análisis foliar.

Cref.- Concentración óptima del nutrimento, propuesto para el cultivo en referencia.

D. Déficit (bajo).

O. Óptimo (suficiente).

E. Exceso (alto).

Cuadro Continuación...

| Tratamiento                | N      | P      | K     | Ca   | Mg    | Fe    | Cu   | Zn    | Mn    | Σ IDOP | Requerimientos |
|----------------------------|--------|--------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|--------|----------------|
| V <sub>1</sub> AN-22       | 4.74   | 0.414  | 3.39  | 2.29 | 0.772 | 80.3  | 34.6 | 43.2  | 110.5 | 318.9  | Zn>Fe>Mn>P>N>  |
| ÍNDICE DOP                 | -13.82 | -24.73 | 8.31  | 14.5 | 18.77 | -54.1 | 87.0 | -60.7 | -36.9 |        | K>Ca>Mg>Cu     |
| NIVEL                      | D      | D      | E     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        |                |
| V <sub>2</sub> CANARIO 101 | 4.71   | 0.440  | 3.83  | 2.40 | 0.820 | 205.3 | 29.5 | 55.4  | 133.3 | 253.1  | Zn>Mn>P>N>     |
| ÍNDICE DOP                 | -14.36 | -20    | 22.36 | 20.0 | 26.15 | 17.3  | 59.5 | -49.6 | -23.8 |        | Fe>Ca>K>Mg>Cu  |
| NIVEL                      | D      | D      | E     | E    | E     | E     | E    | D     | D     |        |                |
| V <sub>3</sub> LAGUNERO 87 | 4.82   | 0.422  | 3.12  | 2.39 | 0.849 | 138.6 | 22.9 | 55.8  | 117.1 | 213.0  | Zn>Mn>P>Fe>N>  |
| ÍNDICE DOP                 | -12.36 | -23.27 | -0.32 | 19.5 | 30.62 | -20.8 | 23.8 | -49.3 | -33.1 |        | K              |
| NIVEL                      | D      | D      | D     | E    | E     | D     | E    | D     | D     |        | Ca>Cu>Mg       |

\*  $DOP = [(C * 100) / Cref] - 100$

Donde: DPO. Desviación del Porcentaje Óptimo.

C. Concentración del elemento, resultado del análisis foliar.

Cref. Concentración óptima del nutriente, propuesto para el cultivo en referencia.

D. Déficit (bajo).

O. Óptimo (suficiente).

E. Exceso (alto).

