



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Agronomía
Comisión de Estudios de Postgrado
Postgrado en Ciencia del Suelo



**EFFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN EL DESARROLLO DE CUATRO GENOTIPOS
DE MAÍZ EN UN SUELO COMPACTADO DEL
ESTADO GUÁRICO**

MSc. Gerardo Romero

2015

**Tesis presentada como requisito para optar al título de
Doctor en Ciencia del Suelo**

COMITÉ CONSEJERO

Dra. Deyanira Lobo Luján
(Tutora)

Dra. Adriana Florentino
(Asesora)

Dra. Amalia Rincón
(Asesora)

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento, a Dios por la fortaleza, persistencia y el entendimiento que me inspiró; mi familia por ser el motivo para seguir superándome y tener la confianza y la paciencia para acompañarme en este camino.

A todas las personas que contribuyeron con la realización de este trabajo de investigación. En especial por su apoyo a:

La profesora Deyanira Lobo, tutora y amiga, por su especial dedicación.

La Dra. Amalia Rincón por sus valiosas sugerencias y apoyo incondicional.

La profesora Adriana Florentino por sus oportunas observaciones y recomendaciones.

La empresa Semillas Aragua, por medio del Ing. Agr. Anselmo Pérez, por el aporte de su genotipo de maíz y el apoyo logístico en la finca Morrocoicito, para realizar el ensayo de campo.

La Fundación DANAC por el soporte técnico a través de los Ing. Agr. Jesús Alezones y Alberto Chassaigne y el aporte de dos genotipos evaluados en el ensayo.

Honorio Rondón y el Ing. Agr. Jhonnel Silvera por su apoyo en las labores de campo.

Al Ing. Agr. Carlos Marín y la Prof. Margarita Cobo, por la asesoría en el diseño estadístico y el análisis de los resultados.

RESUMEN

En un suelo de la serie Coropa del Valle del Río Tiznados, perteneciente a la familia Typic Haplustepts, Francosa fina, mixta, isohipertérmica, el cual presenta problemas de compactación subsuperficial, se evaluó la dinámica del agua disponible para el cultivo de maíz en las capas superficiales, bajo condiciones de estrés hídrico. En la experimentación de campo, se estudiaron los genotipos de maíz: Tocatorón 550 (C₁), Tuxpeño sequía C8 (C₂), DANAC 3273 (C₃) y DANAC 5008 (C₄), de importancia económica y con diferente tolerancia al estrés hídrico, los cuales fueron sometidos a dos condiciones de suplencia de agua (riego y estrés hídrico) y preparación de suelo (con y sin subsolado). Se aplicó un diseño de bloques al azar con arreglo de tratamientos en parcelas divididas con dos tratamientos de suplencia de agua, dos tratamientos de preparación de suelo, cuatro genotipos de maíz y tres repeticiones(2x2x4x3). Se analizaron características físicas del suelo como humedad volumétrica durante el período de crecimiento, resistencia a la penetración, así como una caracterización física en muestras no alteradas y alteradas del mismo. De igual forma, se evaluaron en la planta el rendimiento en grano, el intervalo antésis–estigma, Índice de área foliar, biomasa aérea, peso seco de raíces, partición de biomasa, Índice de cosecha, altura de planta, altura de mazorca y concentración de nutrientes en la hoja. Los resultados de este estudio indicaron que el suelo posee baja infiltración y estabilidad estructural; alta susceptibilidad a la degradación física, alta disponibilidad de nutrientes, con pH ácido y humedad aprovechable del 21,5%. El análisis físico evidenció la presencia de tres capas bien diferenciadas físicamente en los primeros 30 cm; la más superficial alcanza una profundidad de 12 cm con textura franca, densidad 1,36Mg m⁻³, espacio poroso total de 38% y conductividad hidráulica saturada 0,05cm h⁻¹; la capa subyacente de 12-20 cm con textura franco-arcillosa, se presenta con mayor compactación alcanzando 1,78 Mg m⁻³ de densidad aparente y una reducción drástica de la conductividad hidráulica saturada hasta 0,006cm h⁻¹, relacionada con la reducción en la proporción de macroporos que fue inferior al 5%, y la capa más interna (20-30 cm) con características similares a la anterior, aunque con mayor conductividad hidráulica. La evaluación de la humedad remanente en el suelo durante el ciclo de cultivo, mostró que el agua almacenada en la capa superficial hizo un aporte significativo al agua disponible para el cultivo, mientras las capas subyacentes no mostraron cambios significativos, permaneciendo sin variaciones importantes. Este bajo aporte de las capas más profundas, sugirió que la profundidad efectiva del suelo se limitó a la capa superficial (0-12

cm). El estrés hídrico redujo el consumo de agua por el cultivo, redujo en 10% tanto el rendimiento, como el índice de área foliar de los genotipos, mientras la biomasa aérea se redujo en más del 30%, aunque la partición de biomasa no mostró variaciones importantes entre los órganos de la planta. Los genotipos C₁ y C₂ evidenciaron ciertas características de tolerancia al estrés hídrico manteniendo estable el rendimiento. El tratamiento de subsolado aumentó significativamente la humedad disponible para el cultivo, la acumulación de biomasa aérea, mientras la compactación redujo el peso seco de raíces en plantas jóvenes y adultas. Por otra parte, la compactación redujo significativamente el índice de cosecha en los genotipos que mostraron tolerancia al estrés, reduciendo el peso seco de raíces en plantas jóvenes y adultas. El balance hídrico considerando una profundidad efectiva de 12 cm, permitió estimar un consumo total de agua para el cultivo bajo el tratamiento de riego de 339,74 mm, mientras que bajo el tratamiento de estrés hídrico fue de 286,50 mm.

ABSTRACT

The dynamic of available water to the maize grown was studied under water stress conditions in a soil of the Coropa series from the Río Tiznados Valley, classified as Typic Haplustepts, fine-loamy, mixed, Isohyperthermic with subsoil compaction. A field experiment was conducted to evaluate the maize genotypes: Tocarón 550 (C₁), Tuxpeño sequía C8 (C₂), DANAC 3273 (C₃) y DANAC 5008 (C₄); of economic importance and different water stress tolerance under two conditions of water supply (irrigation and water stress) and two soil management systems (deep subsoiling and natural compaction). Treatments were arranged in a split plot design with two levels of water supply, two soil management treatments, four maize genotypes and three replications (2x2x4x3). Soil physical properties were evaluated, such as texture, bulk density, porosity, soil moisture during the growing season, penetration resistance, in disturbed and undisturbed samples. Also plants were evaluated, grain yield, anthesis-silking interval, leaf area index, shoot and root dry matter, biomass partition, harvest index, plant height, insertion height of the top ear and leaf nutrients concentration. The results of this study showed that the soil has low rate of infiltration and weak soil structure; high susceptibility to physical degradation, high available nutrients, acid pH and 15% available water. The physical analysis revealed that exist three soil layers well differentiated at 30 cm depth, the upper layer 0-12 cm deep with loam texture class, 1,36Mg m⁻³ bulk density, 38% of total porosity and 0.05 cm h⁻¹ hydraulic conductivity; a compacted layer (12-20 cm deep) with loamy-clayed texture class, 1,78 Mg m⁻³ bulk density and 0.006cm h⁻¹ hydraulic conductivity related to a reduction of macropores at < 5%, and the deeper layer (20-30 cm) with similar characteristics to the compacted layer but with a higher hydraulic conductivity. The soil moisture evaluation during the growing season, showed that the water stored at the upper layer contributed significantly to the crop available water, while the water at the other layers remain stable without important changes. Water stress reduced crop water consumption, genotypes grain yield and foliar area index in 10%, aerial biomass was reduced over 30% too; however biomass partition did not show important changes within plant organs. Genotypes C₁ y C₂ shown certain tolerant characteristics to water stress and keep stable the grain yield. The subsoiling treatment increased available soil water to the crop, also increased aerial biomass. Compacted condition reduced the harvest index in genotypes C₁ y C₂ and reduced root dry weight in old and young plants. The water balance considering an effective depth of 12cm,

allowed estimating total water consumption for the irrigation treatment of 339,54mm, and 286,50mm for the stress treatment.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Agradecimiento.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	vi
Tabla de contenido	viii
Lista de cuadros	xiii
Lista de figuras	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	3
1.2. Objetivos específicos	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Requerimientos hídricos del maíz	4
2.1.1. Respuesta fisiológica del maíz ante el estrés hídrico	5
2.1.2. Disponibilidad de agua en el suelo y balance hídrico	11
2.1.3. Variables fisiológicas analizadas en estudios con maíz bajo estrés hídrico.....	14
2.2. Procesos relacionados con el almacenamiento y el movimiento del agua en el suelo	17
2.3. La compactación y su relación con la porosidad y la dinámica del agua en el suelo	20
2.4. Efecto de la compactación de suelos en el desarrollo radical de la planta de maíz	24
2.5. Labranza para el cultivo de maíz en suelos compactados	26
3. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1. Selección y caracterización inicial del suelo	30
3.1.1. Descripción del área	30
3.1.2. Características físicas y químicas del suelo.....	31
3.1.3. Curva característica de retención de agua del suelo	32
3.1.4. Caracterización climática.....	34

3.1.5. Evaluación previa del grado de compactación del suelo	37
3.1.6. Presencia de capas compactadas y su distribución en el suelo	37
3.1.7. Propiedades físicas del suelo por capas y su comportamiento hídrico	41
3.1.8. Redistribución del agua en el suelo	45
3.2. Características generales de los genotipos estudiados	47
3.3. Diseño del experimento y tratamientos	49
3.3.1. Diseño del experimento	49
3.3.2. Tratamientos de suplencia de agua	49
3.3.3. Tratamientos de preparación del suelo	54
3.3.4. Siembra de genotipos	55
3.3.5. Labores culturales	55
3.4. Evaluaciones realizadas	56
3.4.1. En el suelo	56
3.4.2. En la planta	58
3.5. Registro de variables climáticas y temperatura de la hoja	60
3.5.1. Variables climáticas	60
3.5.2. Temperatura de la hoja y humedad en el cultivo	60
3.6. Balance hídrico	60
3.7. Factor de respuesta general del cultivo (K_y)	61
3.8. Análisis estadístico de los resultados	62
3.9. Cronograma de actividades de campo.....	62
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
4.1. Variación del contenido de agua del suelo por capas según los tratamientos de suplencia de agua, preparación de suelo y genotipos	64
4.1.1. En los tratamientos de suplencia de agua	64
4.1.1.1. Durante el ciclo de cultivo	64
4.1.1.2. Durante el período de aplicación del estrés	66
a) Capa superficial (0-12 cm)	66
b) Capa compactada (12-20 cm)	67
c) Capa profunda (20-30 cm)	67
4.1.2. En los tratamientos de preparación de suelo	67

4.1.2.1.	Durante el ciclo de cultivo	67
4.1.2.2.	Durante el período de aplicación del estrés	70
	a) Capa superficial (0-12 cm)	70
	b) Capa compactada (12-20 cm)	70
	c) Capa profunda (20-30 cm)	71
4.1.3.	En los tratamientos de genotipos.....	71
4.1.3.1.	Durante el ciclo de cultivo	71
4.1.3.2.	Durante el período de aplicación del estrés	71
	a) Capa superficial (0-12 cm)	71
	b) Capa compactada (12-20 cm)	73
	c) Capa profunda (20-30 cm).....	73
4.1.4.	Interacción de los tratamientos de suplencia de agua con los tratamientos de preparación de suelo	73
4.1.5.	Interacción de los tratamientos de preparación de suelo con los tratamientos de genotipos	74
4.2.	Efecto del subsolado en la resistencia mecánica del suelo	77
4.3.	Variables analizadas en la planta	79
4.3.1.	Rendimiento en grano	79
4.3.1.1.	Efecto de los tratamientos de suplencia de agua	79
4.3.1.2.	Efecto de los tratamientos de preparación de suelo.....	80
4.3.1.3.	Efecto de los tratamientos de genotipos	81
4.3.1.4.	Interacciones entre tratamientos	82
4.3.2.	Intervalo antésis – estigma (ASI)	84
4.3.2.1.	Efecto de los tratamientos de suplencia de agua	84
4.3.2.2.	Efecto de los tratamientos de preparación de suelo.....	85
4.3.2.3.	Efecto de los tratamientos de genotipos	86
4.3.2.4.	Interacciones entre tratamientos	86
4.3.3.	Índice de área foliar (IAF).....	88
4.3.3.1.	Efecto de los tratamientos de suplencia de agua	88
4.3.3.2.	Efecto de los tratamientos de preparación de suelo.....	90
4.3.3.3.	Efecto de los tratamientos de genotipos	91
4.3.3.4.	Interacciones entre tratamientos	91

4.3.4. Biomasa aérea.....	93
4.3.4.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua	93
4.3.4.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo.....	94
4.3.4.3. Efecto de los tratamientos de genotipos	96
4.3.4.4. Interacciones entre tratamientos	97
4.3.5. Peso seco de raíces	100
4.3.5.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua	100
4.3.5.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo.....	102
4.3.5.3. Efecto de los tratamientos de genotipos	104
4.3.6. Partición de biomasa aérea.....	107
4.3.6.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua	107
4.3.6.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo.....	108
4.3.6.3. Efecto de los tratamientos de genotipos	108
4.3.6.4. Interacciones entre tratamientos	109
4.3.7. Índice de cosecha (IC).....	110
4.3.7.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua	110
4.3.7.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo.....	111
4.3.7.3. Efecto de los tratamientos de genotipos	111
4.3.7.4. Interacciones entre tratamientos	112
4.3.8. Características biométricas.....	113
4.3.8.1. Altura de planta	113
a) Efecto de los tratamientos de suplencia de agua .	113
b) Efecto de los tratamientos de preparación de suelo	114
c) Efecto de los tratamientos de genotipos	115
4.3.8.2. Altura de mazorca	116
a) Efecto de los tratamientos de suplencia de agua .	116
b) Efecto de los tratamientos de preparación de suelo.....	117
c) Efecto de los tratamientos de genotipos	117
4.3.9. Concentración de nutrientes en las hojas.....	119
4.4. Análisis general del efecto de los tratamientos en las variables	

evaluadas	121
4.4.1. Variables de suelo	121
4.4.2. Variables de la planta	124
4.5. Variables climáticas en el ensayo	127
4.5.1. Precipitación y temperatura ambiental en la unidad experimental	127
4.5.2. Temperatura de la hoja y humedad relativa ambiental en el cultivo	128
4.6. Balance hídrico.....	129
4.7. Factor de respuesta general del cultivo (K_y).....	138
4.8. Producción obtenida con la evapotranspiración actual (E_a)	138
5. CONCLUSIONES	140
6. RECOMENDACIONES	143
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
8. ANEXOS	158

LISTA DE CUADROS

	Página
1. Características químicas del suelo	31
2. Distribución de tamaño de partículas y densidad aparente del suelo.	32
3. Distribución de tamaño de partículas del suelo por capas.....	42
4. Características estructurales del suelo	43
5. Descripción de los genotipos evaluados	48
6. Evapotranspiración real del cultivo según la etapa de desarrollo	52
7. Necesidades estimadas de agua del cultivo según la etapa de desarrollo ...	53
8. Aporte hídrico efectivo con el riego y aporte total al cultivo para los tratamientos de suplencia de agua.	53
9. Caracterización química del agua de riego, proveniente del Río Tiznados...	54
10. Cronograma de actividades de campo	63
11. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) para los tratamientos de suplencia de agua por capas de suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico	66
12. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) para los tratamientos de preparación de suelo por capas se suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico	70
13. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) para los tratamientos de genotipos por capas se suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico	72
14. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) por capas se suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico, para la interacción de los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo	73
15. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) para la interacción de los tratamientos de preparación de suelo-genotipos por capas se suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico	75

16. Estadística descriptiva de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) del suelo (MPa) a 15 cm de profundidad antes y después del subsolado	77
17. Valores promedio de los parámetros considerados para calcular el IAF, según los tratamientos de suplencia de agua	93
18. Valores promedio del peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para los tratamientos de suplencia de agua	107
19. Valores promedio del peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para los tratamientos de preparación de suelo	108
20. Valores promedio del peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para los tratamientos de genotipos ...	109
21. Valores promedio del peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para los tratamientos de suplencia de agua	109
22. Valores promedios de macro y micronutrientes en hojas, para los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo.....	120
23. Valores promedios de elementos en hojas según los tratamientos de genotipos	120
24. Resumen de los resultados del análisis de la varianza, para las variables estudiadas en la planta según los tratamientos.....	125
25. Valores de precipitación acumulada durante el ensayo y promedio de temperatura ambiental por períodos de 15 días	128
26. Valores promedio de temperatura en la hoja y humedad relativa del medio ambiente por genotipo, medidos durante el período de estrés, (11:30-12 m)	128
27. Valores promedios de temperatura en la hoja por genotipo, durante el período de estrés, entre 11:30 am y 12 m.	129
28. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo, para el tratamiento de riego, en la etapa vegetativa.....	131

29. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo, para el tratamiento de riego, en la etapa de floración	132
30. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo, para el tratamiento de riego, en la etapa de llenado de grano	133
31. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo, para el tratamiento de riego, en la etapa de maduración	134
32. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo, para el tratamiento de estrés, en la etapa de floración	135
33. Comparación del Etc del cultivo bajo el tratamiento de suplencia de agua, considerando una profundidad máxima de 12 cm	136

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Absorción del nitrógeno en los diferentes órganos, según la etapa de crecimiento del maíz.	8
2. Ubicación relativa de la finca Morrocoicito dentro del Valle del Río Tiznados...	30
3. Tasa de infiltración del suelo en tres sitios del área experimental.....	32
4. Curva característica de retención de agua del suelo bajo estudio.....	33
5. Resumen de datos climatológicos de la estación climática Río Verde (1967-2001) y precipitación medida en el ensayo	35
6. Resumen de las variables ETo y ETo/2, en comparación con la precipitación según los datos de la estación de Río Verde (1967-2001).....	36
7. Resistencia a la penetración en tres sitios del área experimental	38
8. Distribución de la resistencia a la penetración del suelo hasta la profundidad de 15 cm, a un contenido de humedad ($g\ g^{-1}$) de 0,05.....	39
9. Distribución de la resistencia a la penetración del suelo hasta la profundidad de 15 cm, a un contenido de humedad ($g\ g^{-1}$) de 0,12.....	40
10. Distribución de la profundidad de la capa compactada utilizando el penetrómetro de reloj a un contenido de humedad ($g\ g^{-1}$) de 0,05	41
11. Distribución porcentual de los agregados estables al agua por el método de Yoder modificado	44
12. Variación del contenido de humedad del suelo después de saturación en función del tiempo.....	45
a. en la capa superficial 0-12 cm	45
b. en la capa compactada(12-20 cm)	46
c. en la capa interna(20-30 cm)	47
13. Representación de la unidad experimental, mostrando en el recuadro interno el área de evaluación.....	50
14. Distribución general de los tratamientos en el campo	51
15. Valores promedio del contenido de agua del suelo($v\ v^{-1}$),en la capa superficial	64

a través del ciclo de cultivo, para los tratamientos de suplencia de agua	
16. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}), en la capa compactada a través del ciclo de cultivo, para los tratamientos de suplencia de agua	65
17. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) en la capa profunda, a través del ciclo de cultivo, para los tratamientos de suplencia de agua	66
18. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}), en la capa superficial para los tratamientos de preparación de suelo	67
19. Valores promedio del contenido volumétrico de agua, en la capa compactada para los tratamientos de preparación de suelo	68
20. Valores promedio del contenido volumétrico de agua, en la capa profunda para los tratamientos de preparación de suelo	69
21. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}), en la capa 0-12 cm para los tratamientos de genotipos	72
22. Rendimiento promedio en grano para los tratamientos de suplencia de agua ..	79
23. Rendimiento promedio en grano para los tratamientos de preparación de suelo	81
24. Rendimiento promedio en grano para los tratamientos de genotipos	82
25. Rendimiento promedio en grano, para la interacción de tratamientos de genotipos - suplencia de agua	83
26. Valores promedio del ASI para los tratamientos de suplencia de agua	84
27. Valores promedio del ASI para los tratamientos de preparación de suelo	85
28. Valores promedio del ASI para los tratamientos de genotipos	86
29. Valores promedio del ASI para la interacción de tratamientos de suplencia de agua, preparación de suelo y genotipos	87
30. Valores promedio del Índice de Área Foliar Total (IAFt) para los tratamientos de suplencia de agua	89
31. Valores promedio del Índice de Área Foliar Verde (IAFv) para los tratamientos de suplencia de agua	89
32. Valores promedio del Índice de Área Foliar Total (IAFt) para los tratamientos de preparación de suelo	90
33. Valores promedio del Índice de Área Foliar Verde (IAFv) para los tratamientos	90

de preparación de suelo	
34. Valores promedio del Índice de Área Foliar Total (IAFt) para los tratamientos de genotipos	91
35. Valores promedio del Índice de Área Foliar Total (IAFt) para la interacción de los tratamientos de genotipos - suplencia de agua	92
36. Valores promedio de la biomasa aérea a los 45 dds., para los tratamientos de suplencia de agua	93
37. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds., para los tratamientos de suplencia de agua	94
38. Valores promedio de la biomasa aérea a los 45 dds., para los tratamientos de preparación de suelo	95
39. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds., para los tratamientos de preparación de suelo	95
40. Valores promedio de la biomasa aérea a los 45 dds., para los tratamientos de genotipos	96
41. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds., para los tratamientos de genotipos	97
42. Valores promedio de la biomasa aérea a los 45 dds., para la interacción de los tratamientos de suplencia de agua- genotipos	98
43. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds., para la interacción de los tratamientos de suplencia de agua -genotipos	99
44. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds., para la interacción de los tratamientos de preparación de suelo -genotipos	100
45. Valores promedio de peso seco de raíces, para los tratamientos de suplencia de agua en plantas jóvenes (45 dds)	100
46. Valores promedio de peso seco de raíces, para los tratamientos de suplencia de agua en plantas adultas (98 dds)	101
47. Valores promedio del peso seco de raíces., para los tratamientos de preparación del suelo en plantas jóvenes (45 dds)	102
48. Valores promedio del peso seco de raíces para los tratamientos de preparación del suelo en plantas adultas (98 dds)	103
49. Valores promedio del peso seco de raíces, para los tratamientos de genotipos	104

en plantas jóvenes (45 dds)	
50. Valores promedio de peso seco de raíces, para los tratamientos de genotipos en plantas adultas (98 dds)	105
51. Detalle de raíces del genotipo C ₃ , con crecimiento lateral bajo el tratamiento de compactación	105
52. Valores promedio del IC, para la los tratamientos de suplencia de agua	110
53. Valores promedio del IC, para la los tratamientos de preparación de suelo	111
54. Valores promedio del IC, para los tratamientos de genotipos	112
55. Valores promedio de IC, para la interacción de tratamientos de genotipos - suplencia de agua.....	113
56. Valores promedio de altura de planta, para los tratamientos de suplencia de agua.	114
57. Valores promedio de altura de planta, para los tratamientos de preparación de suelo.....	115
58. Valores promedio de altura de planta, para los tratamientos de genotipos.....	116
59. Valores promedio de altura de mazorca, para los tratamientos de suplencia de agua.....	117
60. Valores promedio de altura de mazorca, para los tratamientos de preparación de suelo	118
61. Valores promedio de altura de mazorca, para los tratamientos de genotipos ...	118
62. Distribución de la lámina de agua en la capa superficial (0-12) del suelo, para los tratamientos de suplencia de agua durante el ciclo de cultivo.....	137

1. INTRODUCCIÓN

El maíz representa más del 50% de la producción de cereales en nuestro país y alrededor del 10% del valor de la producción del subsector agrícola vegetal (Fedeagro, 2009). Las principales zonas productoras de maíz en el país, abarcan la región de los llanos, ubicada en los estados Portuguesa, Guárico, Barinas y los valles del estado Yaracuy, de donde se obtiene más del 80% de la producción nacional.

Este cultivo se siembra principalmente en época de lluvias, por lo que está sujeto al aporte de agua natural por la precipitación, sin embargo son conocidos los diversos problemas relacionados con el suelo, entre los que destacan la baja infiltración y el bajo almacenamiento del agua, lo cual ocasiona deficiencias temporales de suplencia de agua durante el ciclo de desarrollo. Entre los factores que contribuyen a esta situación, se citan la fragilidad de la estructura del suelo, su escaso contenido de materia orgánica, la alta susceptibilidad al sellado superficial y la existencia de capas compactadas a pocos centímetros de profundidad, derivados del sistema de siembra tradicional (Cabrera y Rodríguez, 1996).

Para Cabrera y Rodríguez (1996), esta ineficiencia en la captación y almacenamiento del agua derivados de las condiciones de suelo y los sistemas de producción, se conjuga con la ubicación de estos sistemas en zonas con una alta variabilidad climática, especialmente en la distribución y cantidad de las lluvias. Tal situación, origina la aparición de condiciones adversas al desarrollo del cultivo, como el estrés hídrico en etapas críticas de su desarrollo (floración y llenado de grano), que pueden afectar severamente los rendimientos debido a la movilización de reservas dentro de la planta (Ascencio, 2000). Rodríguez (2000) indica que el período de una a dos semanas antes y después de la floración, es un lapso muy sensible para la reducción de los rendimientos en maíz, pudiendo alcanzar pérdidas en grano del 25%.

Edmeades y Bänziger (1996), señalan que mejoras en el manejo de la suplencia natural de nitrógeno y agua puede cerrar la brecha entre el rendimiento potencial y el real entre el 15-20%. Asimismo, Xiping *et al.*(2002), plantean que el cambio climático puede ocasionar un

calentamiento severo en los trópicos, por lo que los sistemas de manejo deben orientarse a encarar el problema creciente de sequía.

Por otra parte, los genotipos de maíz que se utilizan actualmente son de alto requerimiento tecnológico, siendo la adecuada suplencia de agua en cantidad y oportunidad, uno de los insumos principales, necesarios para expresar el potencial genético que estos materiales poseen. Se estima que en nuestro país, la producción se fundamenta en el uso de híbridos convencionales (95% del área sembrada) sin considerar la gran diversidad de zonas edafoclimáticas (Cabrera y Rodríguez, 1996).

Esta situación, se evidencia en la estabilidad de los rendimientos nacionales en los últimos años, alrededor de los 3,4 Mg ha⁻¹, aunque el nivel tecnológico haya aumentado considerablemente (Fedeagro, 2009). Sin embargo, la brecha entre la producción experimental y la de campo está entre 0,4 y 0,6 con una eficiencia en la relación ingreso/costo de 28%, los cuales son valores bajos comparados con otros países (Berroterán y Zinck, 2000).

Las condiciones de suelos ya señaladas, no solo limitan la expresión en variables como el rendimiento, sino que afectan la calidad de los productos finales. Así, la rentabilidad de plantaciones establecidas con alta inversión en insumos, se ve seriamente afectada, lo cual genera pérdidas cuantiosas entre los agricultores. Según datos de Fedeagro (2009), para el período invierno 2008, los costos de producción estuvieron alrededor de 2.160 Bs.F ha⁻¹, representando la semilla, un 10% de tales costos. Estos altos costos, se conjugan con el hecho de que durante los primeros 30 días de la plantación, se invierte más del 60% de los mismos, aumentando el riesgo de pérdidas económicas por variables externas, como las deficiencias temporales de humedad en el suelo, ya señaladas.

Se conoce que las variaciones hídricas del suelo, generan cambios fisiológicos importantes en el cultivo, tales como la acumulación de aminoácidos y variaciones en el potencial hídrico dentro de la planta (Edmeades y Bänziger, 2004). Estos cambios, se manifiestan de manera diferencial, según la capacidad del genotipo para tolerar niveles de estrés en cada etapa del desarrollo, por lo que los rendimientos se verán afectados diferencialmente.

Con base a esta problemática, se propone evaluar el efecto del déficit hídrico temporal de un suelo con problemas de compactación subsuperficial, sobre el desarrollo de genotipos de maíz con diferente tolerancia al estrés hídrico. Asimismo, se plantea asociar los efectos del déficit hídrico en el desarrollo de las plantas, evaluando variables fisiológicas en diferentes etapas de desarrollo del cultivo.

Siendo la Fundación Para la Investigación Agrícola Desarrollos Agrícolas Naranjal (DANAC), una de las instituciones más importantes dedicadas al desarrollo de nuevos genotipos de maíz adaptados a las zonas productoras del país, se contó con su apoyo a través del suministro de genotipos desarrollados en su programa de mejoramiento genético, con diferente tolerancia al estrés hídrico. Asimismo, Semillas Aragua, empresa ampliamente conocida en la producción y distribución de semilla de maíz, facilitó sus instalaciones para el ensayo, además de los equipos necesarios y un genotipo de su colección.

Objetivo general:

Evaluar el efecto del déficit hídrico en un suelo con compactación subsuperficial, en el desarrollo de cuatro genotipos de maíz, bajo dos condiciones de aprovisionamiento de agua.

Objetivos específicos:

1. Analizar el efecto del déficit hídrico temporal sobre el agua disponible para el maíz, a través del ciclo de cultivo.
2. Evaluar el efecto de capas compactadas sobre la dinámica del agua en el suelo y su aprovechamiento por diferentes genotipos de maíz.
3. Determinar el efecto de los cambios del contenido de humedad en el suelo sobre el desarrollo y el rendimiento de los genotipos de maíz.
4. Relacionar las variaciones hídricas del suelo, y su efecto en el intervalo Antésis-Estigma (ASI) y con otras variables de la planta.
5. Comparar la respuesta adaptativa de los genotipos sobre la distribución de asimilados entre los diferentes órganos de la planta, en condiciones de déficit hídrico.
6. Evaluar el efecto del déficit hídrico sobre el desarrollo radical de los genotipos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Requerimientos hídricos del maíz.

El maíz requiere de 500 a 600 mm de agua durante el ciclo de cultivo, siendo el período que inicia desde la 8a o 9a hoja cuando se produce el máximo consumo diario. Además es la etapa cuando comienza a formarse la espiga y se define el rendimiento potencial máximo de la planta, hasta fines del llenado del grano;requiriendo unos 300 mm (Viarural, 2012).No obstante,investigadores como Bustamante *et al.*(2006), han calculado un consumo para el ciclo total en maíz de 440 mm, mientras que para genotipos de madurez media, dependiendo del clima,se han reportado requerimientos entre 500 y 800 mm (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación[FAO],2013).

Aunque las necesidades hídricas del cultivo de maíz varían a lo largo del ciclo y de acuerdo al genotipo, la fase de floración es el periodo más crítico para asegurar máximos rendimientos (Infoagro, 2012). No obstante, la falta de agua al inicio del cultivo, reduce drásticamente el número de plantas y con ello la producción total, mientras que el déficit en la etapa vegetativa reduce el crecimiento, el desarrollo foliar y la actividad fotosintética, y aunque no daña tan severamente la productividad, los efectos dependen de los materiales genéticos usados, los cuales generalmente son altamente exigentes, acentuando los efectos negativos de estos períodos secos sobre el cultivo (Rodríguez, 2000).

Como la demanda hídrica varía según la etapa de desarrollo del cultivo, a través del coeficiente de cultivo denominado Kc, se estima la eficiencia en el uso del agua por el cultivo relacionando la evapotranspiración real (ETr) con la evapotranspiración de referencia (ETo) para diferentes etapas de desarrollo del mismo (FAO, 2013; Della Maggiora *et al.*, 2002). Bustamante *et al.* (2006), calcularon un valor máximo de Kc de 1,25 para variedades intermedias, aunque este valor se alcanza a después de los 60 días después de la siembra. Para FAO (2013), a mitad del ciclo (50 días) se alcanzan los valores máximos de Kc (1,05-1,2), mientras que previo a la floración (30-50 días), se observan valores entre 0,7 y 0,85.

Según Zwart y Bastiaanssen (2004), los resultados de investigación en maíz revelan que la eficiencia en el uso del agua para este cultivo, se encuentra en un rango 1,1 - 2,7 kg m⁻³, mostrando este rango, la posibilidad de mejorar la productividad, si es optimizado el uso del

agua bajo sistemas de manejo más eficientes. Al respecto, Novák *et al.* (2005), encontraron que las condiciones atmosféricas afectaron la relación entre la transpiración actual y la potencial del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico, mientras que bajo condiciones de adecuada suplencia de agua, esta característica fue independiente de tales condiciones.

En Venezuela, la delimitación de áreas potenciales para la producción de maíz se ha basado en la precipitación como criterio principal; a tal efecto, se han establecido como regiones moderadamente aptas a aptas para su cultivo, aquellas con un período húmedo de 3 a 6 meses y una humedad durante el período vegetativo alrededor de 600 a 900 mm (Rodríguez, 2000). Basados en el análisis de variables climáticas, Brito y Brito (1983), propusieron una metodología definiendo períodos para la ejecución de prácticas agrícolas, en función de la precipitación y la evapotranspiración de referencia, considerando como el período húmedo, aquel comprendido en los meses donde la precipitación supera a la evapotranspiración de referencia, siendo este, el período cuando se considera un seguro suministro de agua para el adecuado desarrollo de los cultivos de secano, como el maíz.

La época de lluvias en Venezuela, está condicionada por grandes sistemas sinópticos, donde destaca la “Zona de Convergencia Intertropical” y la “Zona de Alta Presión del Atlántico”; sin embargo, tanto la interacción de estos sistemas como el efecto de otros fenómenos atmosféricos, pueden ocasionar períodos secos en la temporada lluviosa no contemplados en el balance hídrico tradicional (Rodríguez, 2000).

Sobre la importancia de la adecuada suplencia de agua al cultivo, Edmeades y Bänziger (1996), afirman que entre el 50-70% del potencial de rendimiento actual en maíz, puede lograrse solo con la adición exógena de agua y nitrógeno. Por su parte, Tolk y Evett (2012) indican que algunas características del suelo como la textura, así como las variaciones climáticas, afectan la habilidad del cultivo para usar el agua por encima o por debajo del punto de marchitez permanente, en un determinado momento; resaltan además, la necesidad de un adecuado manejo de la suplencia de agua.

2.1.1. Respuesta fisiológica del maíz ante el estrés hídrico.

Medrano y Flores (2003), destacan que el estrés hídrico afecta la mayor parte de las funciones y procesos vitales en la planta, resaltando la reducción del crecimiento celular,

síntesis de proteínas y formación de protoclorofila, entre otros; estas reacciones se traducen en respuestas inmediatas como el cierre estomático y la reducción de la conductividad hidráulica en el xilema. Estos autores indican además, otros efectos evidentes en el largo plazo, como la regulación del crecimiento de órganos, entre ellos las raíces y hojas, y la reducción del rendimiento.

Para Hare *et al.* (1999), los fisiólogos han orientado por largo tiempo el estudio de las respuestas de la planta ante el estrés hiperosmótico, como la condición de déficit hídrico, al análisis de la acumulación de prolina libre en varias especies de plantas. En este sentido, se tienen muchas evidencias sobre la acumulación de este aminoácido (Bates *et al.*, 1973), así como la rápida movilización de reservas de carbono, nitrógeno y energía durante el proceso (Hare *et al.*, 1999). Según Khedr *et al.* (2003), la prolina promovería las proteínas protectoras reguladoras del estrés en condiciones salinas.

Sin embargo, no se conoce cuál es el mediador primario en la respuesta celular al déficit hídrico y su orden de importancia, así como la transducción y transcripción genética en las diferentes expresiones de la planta (Blum, 2004). Esto ha motivado la realización de trabajos basados en la hipótesis de múltiples señales de transducción entre percepción del estrés y la expresión genética. Según estos trabajos, la mayor vía posible envuelve la producción de ácido abscísico (ABA), el cual induciría la respuesta de la planta hacia la acumulación de prolina (Hare *et al.*, 1999; Blum, 2004). Por su parte, Wilkinson y Davies (2002) resaltan el importante rol del ABA en la regulación del comportamiento de los estomas y el intercambio de gas en plantas bajo sequía.

La acumulación de prolina, resultaría de la inactivación de su proceso de oxidación a cargo de la enzima prolina deshidrogenasa, el cual es un mecanismo de control normal en las plantas, que se altera por condiciones de estrés, (Stewart *et al.*, 1977; Hare *et al.*, 1999). A los efectos de hacer la determinación rápida de prolina libre, Bates *et al.* (1973), desarrollaron un método de determinación colorimétrica, que permite cuantificar, en el campo, la concentración de prolina en un rango de 0,1 a 36,0 μ moles por gramo de peso fresco de material. Waldren y Teare (1974) utilizando la metodología de Bates *et al.* (1973), midieron la acumulación de prolina en hojas de sorgo y soya, encontrando valores

significativos cuando el potencial de agua en la hoja fue superior a -12 y -24 bar (-1200 y -2400 kPa), para estos genotipos.

Estudios posteriores como el de Sairam y Dube (1984), quienes encontraron una alta acumulación de prolina en plantas de trigo en condiciones de estrés hídrico, han consolidado esta metodología, señalando que en sus estudios se han detectado diferencias varietales en el grado de acumulación de prolina, sin observar efectos sobre el rendimiento.

En Venezuela, Laborem *et al.* (1991), trabajando con diferentes patrones de cítricos, no encontraron diferencias en el contenido de este aminoácido, bajo condiciones de estrés de humedad, en mezclas de suelo realizadas en potes.

En maíz, algunos estudios realizados por Castrillo *et al.* (2004), no mostraron resultados contundentes sobre la respuesta de la acumulación de aminoácidos al estrés hídrico en las plantas. Sin embargo, Raymond y Smirnov (2002) hallaron acumulación de prolina en la zona de crecimiento de raíces primarias en semillas de maíz, resaltando que la prolina constituyó el 10% de los aminoácidos liberados por el endospermo. Jiang y Zhang (2002) encontraron que el incremento en el contenido de ABA precedió la generación de enzimas antioxidantes en hojas de maíz, mientras que estudios realizados por Cutler *et al.*, (1997) en cultivos de células de maíz revelaron la compleja suma de efectos de la acción de ABA en la absorción, transporte y activación hormonal.

Según Hare *et al.* (1999), los niveles de ABA, aunque se elevan con el estrés, declinan a niveles iniciales bajo condiciones sostenidas de dicho estrés. Esta evidente complejidad en la red de señales que controlan la respuesta genética, les ha sugerido la necesidad de mayor investigación sobre los eventos que regulan la acumulación de prolina y los cambios en la concentración de ABA. Por otra parte, según Wilkinson y Davies (2002) existe una gran cantidad de factores que modifican la señal que induce la producción de ABA y su intensidad, destacando que dicha modificación se produce a través de ajustes en el pH entre los componentes de la raíz y la hoja.

Estos cambios hormonales derivados del estrés, afectan de manera integral el desarrollo de la planta, repercutiendo en su crecimiento, desarrollo y rendimiento económico, pudiendo

evidenciarse su efecto a través de los órganos como la raíz, las hojas, el tallo o los órganos reproductores (Blum, 1988).

Para Ritchie *et al.*(1992), es necesario considerar la etapa de crecimiento en la cual se encuentra el cultivo; así, durante los primeros 35 días después de la siembra, la demanda de nutrientes como el nitrógeno en el maíz es relativamente baja (Figura 1), aumentando exponencialmente después hasta los 60 días cuando comienza a decrecer, por lo que el efecto del estrés difiere según la etapa del cultivo, afectando procesos diferentes y por lo tanto generando cambios diversos.

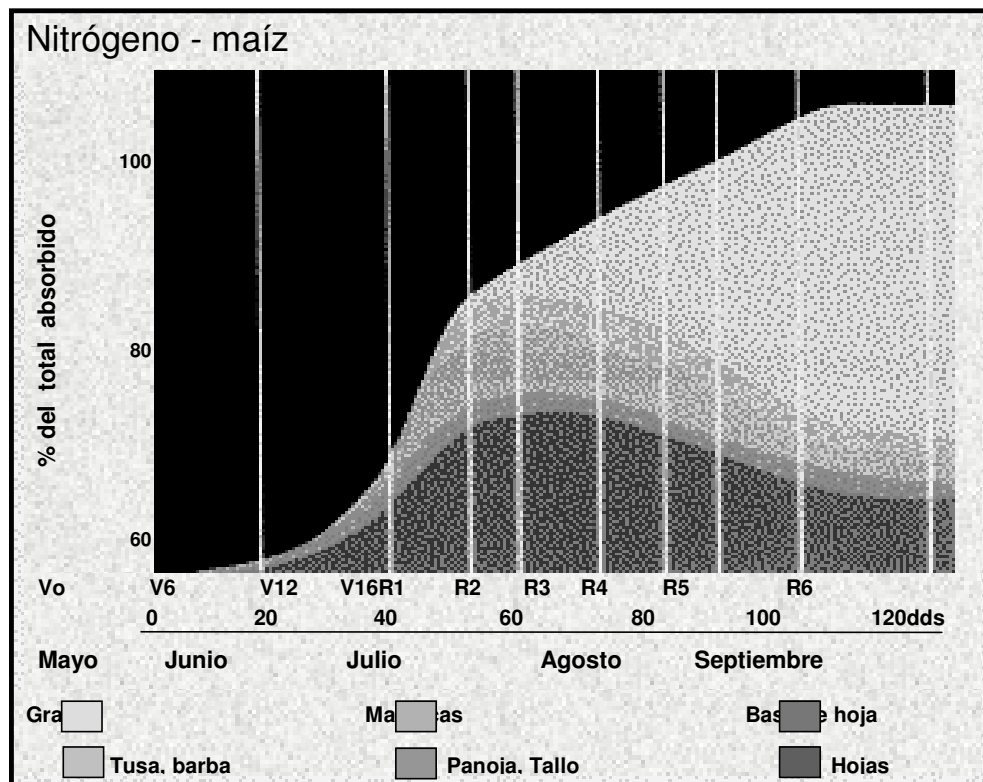


Figura 1. Absorción del nitrógeno en los diferentes órganos, según la etapa de crecimiento del maíz. Adaptado de IASTATE, 2004. dds = días después de la siembra.

Edmeades *et al.*(1992), consideran que la sequía es probablemente el factor más limitante para la producción de maíz en el trópico, induciendo pérdidas de hasta 17% de los rendimientos, debido al déficit hídrico. Edmeades yBänziger (1996) señalan que los mayores efectos de la sequía sobre el rendimiento de maíz, son los producidos cuando se presenta durante el llenado de grano, y pocas son las opciones de manejo es esta etapa. Indican asimismo, que dentro del programa de mejoramiento de maíz para tolerancia a sequía y bajo contenido de nitrógeno, el rendimiento en grano sigue siendo la característica primaria de selección. Asimismo, San Vicente *et al.* (1999), indican que los efectos de la sequía son más acentuados en presencia de factores como: baja fertilidad del suelo, prácticas ineficientes de manejo, y estrés biótico.

Por otra parte, Bolaños y Edmeades (1993a) destacan, que el rendimiento en grano de maíces tropicales,caracterizados por bajo índice de cosecha, puede ser mejorado, manejando el estrés hídrico en etapa de floración; no obstante, otras características secundarias útiles, son el número de mazorcas por planta y el intervalo entre la aparición de la floración masculina y la floración femenina, las cuales han demostrado ser estables y muy asociadas al comportamiento de los genotipos sometidos a estrés hídrico.

Otros autores como Zwart y Bastiaanssen (2004), señalan que el maíz es una especie que puede ser más eficiente en el uso del agua cuando es sometida a estrés, lo cual, es importante en regiones con limitada disponibilidad de agua para los cultivos.

Estudios recientes de la fisiología de plantas de maíz, han mostrado que bajo condiciones de estrés hídrico se produce un retardo en el desarrollo de la floración femenina y masculina, siendo la inflorescencia masculina menos afectada (Blum, 2004; Bolaños y Edmeades, 1993b). Dicho efecto, causa un aumento en el intervalo de tiempo entre la aparición de la floración femenina (Silking en inglés) y la masculina (Antésis) denominado comúnmente como ASI (antésis-silking interval en inglés), el cual reduce la probabilidad de polinización en la planta y con ello se afecta directamente el rendimiento de la planta (Edmeades yBänziger, 1996; Blum, 2004). Esta característica, ha sido consistente en la mayoría de los estudios y ha resultado altamente hereditaria, por lo que se ha convertido en una de las principales a evaluar, después del rendimiento, entre las características secundarias (Bolaños y Edmeades, 1993a)

En tal sentido, Ribaut *et al.* (2004), han asociado la expresión del ASI con seis regiones identificadas en algunos cromosomas del maíz, denominadas “loci de características cuantitativas” (QTL por sus siglas en inglés). Estos QTL explican el 50% de la variabilidad fenotípica observada, la cual ha representado cambios de hasta 10,5 días para el ASI, permitiendo además de entender el comportamiento de características heredables y la acción genética, usarlas como marcadores moleculares en programas de mejoramiento. En líneas tropicales bajo condiciones de sequía, San Vicente *et al.* (1999), han reportado un incremento de 4,4 días en el ASI, siendo referencia para nuestro país.

Según Westgate (1996), la asincronía en el desarrollo floral y el aborto de ovarios fertilizados, son responsables de las pérdidas en mazorca causadas por la sequía en la etapa de floración en maíz, donde el retardo en la emergencia de la floración femenina, es el factor más limitante en este proceso. Por otra parte, en estudios relacionados con el mejoramiento de maíz a la sequía, Bolaños *et al.* (1993), encontraron que el efecto en líneas tolerantes sobre el rendimiento en grano, el ASI y el índice de cosecha, fueron menos importantes en aquellas líneas donde hubo mejor partición de biomasa hacia la inflorescencia femenina en floración.

Boyer y Westgate (2004), enfatizan que el número de granos disminuye debido a muchos cambios en el desarrollo, como el aborto de ovarios, lo que ocurre por una inhibición de la fotosíntesis y el decrecimiento en el flujo fotosintético a los órganos en desarrollo.

Otra respuesta sólidamente relacionada con este tipo de estrés, es la longitud radical y su estructura, donde el ABA puede tener un rol positivo en la promoción del crecimiento radical bajo tales condiciones (Blum, 2004). Para Lynch (1995), los estudios típicos de distribución de raíces se refieren a la biomasa radical o el largo de las raíces como una función de factores, tales como la profundidad del suelo, distancia del tallo y posición entre plantas vecinas; sin embargo, la configuración espacial o arquitectura del sistema radicales uno de los aspectos más importantes a evaluar bajo condiciones de limitada disponibilidad de agua y nutrientes, siendo necesario investigaciones multidisciplinarias para mejorar el entendimiento de los cambios que se generan.

Buczko *et al.*(2009) por su parte, han indicado que en muchos estudios, la evaluación del sistema radicular en la planta en maíz se ha realizado a través de la toma de muestras a cierta distancia de la base del tallo, tanto en la hilera como perpendicular a la misma, usando el método del cilindro principalmente. En tales estudios, el bajo número de muestras utilizadas ha sido limitante para la validez de los resultados; por eso, advierten sobre la heterogénea distribución de las raíces en cultivos en hilera, sugiriendo para estudios de densidad de largo de raíces en maíz, la necesidad de tomar más de diez muestras por parcela, para reducir el error por debajo del 20%.

2.1.2. Disponibilidad de agua en el suelo y balance hídrico.

El balance hídrico, permite identificar los periodos en que hay disponibilidad de agua para el crecimiento de los cultivos, los periodos en que existen deficiencias y excedentes de agua en el suelo, los periodos en que se recarga y aquellos en los que se usa el agua del suelo. Es una herramienta versátil que puede utilizarse a diferentes escalas temporales (anual, estacional, mensual, quincenal, diaria) y espaciales (grandes áreas del globo, regiones, cuencas hidrográficas, parcelas) (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIA], 2012).

Para Comerma y Blavia (1972), en Venezuela fue utilizado el análisis sobre los patrones de distribución de humedad en el suelo, para estimar la capacidad de suministro del agua a ciertos cultivos, según sus requerimientos específicos, lo que permitió establecer parcialmente las necesidades de riego y/o drenaje del suelo. No obstante al comparar los gráficos de distribución de humedad, medida con datos de balance hídrico calculado en suelos del estado Yaracuy, encontraron fuertes discrepancias en los resultados, señalando que los patrones de distribución de humedad del suelo eran pobremente estimados por un balance hídrico regional y mensual, sugiriendo separar zonas de humedecimiento relacionadas tanto con el agua útil, como los estadios relativos a su movilidad.

Según lo enuncian Sokolov y Chapman (1981), el estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad, la cual establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante

cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.

En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico en una cuenca, comprenden la precipitación (P), realmente recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales (Q_{sl}) y subterráneas (Q_{ul}) recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera. Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua (E) y la salida por escorrentía de agua superficial (Q_{sO}) y subterránea (Q_{uO}) desde la masa de agua considerada. Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada (ΔS) aumenta y cuando ocurre lo contrario, disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia (v) (Sokolov y Chapman (1981), Durand-Dastes (2012). Así, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación:

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{sO} - Q_{uO} - \Delta S - v = 0$$

Para Durand-Dastes (2012) los principales aportes se efectúan por las precipitaciones, mientras que las pérdidas se deben esencialmente a la combinación de la evaporación y la transpiración de las plantas, lo cual se designa bajo el término evapotranspiración. Las dos magnitudes se evalúan en cantidad de agua por unidad de superficie, expresadas generalmente en altura de agua, donde el milímetro es la unidad más utilizada. El escurrimiento a partir de una unidad de superficie se contará en las pérdidas y la infiltración se considera como una puesta en reserva, bajo forma de napas subterráneas o de agua capilar en el suelo.

Según Fuentes (1998), para realizar el balance hídrico en el suelo, es necesario considerar el agua que puede almacenar el suelo y ser utilizada por las plantas, la cual depende de las siguientes variables: el tipo de suelo, la capacidad de campo, el punto de marchitez, la profundidad de las raíces y la densidad aparente del suelo

Considerando estas variables, el balance para un período dado y considerando el tipo de suelo y cultivo específico quedaría de esta siguiente forma:

$$Wf = Wi + Pap + N + H + Wc + Evt + I \quad (1)$$

Siendo:

- Wf*: Cantidad de agua en la capa activa del suelo (aquella donde se desarrolla el sistema radical de cada cultivo)
- Wi*: Cantidad de agua en la capa activa del suelo al inicio del período
- Pap*: Precipitación aprovechable (precipitación efectiva en el suelo)
- N*: Norma de riego aplicadas a los cultivos (requerimientos específicos según especie y manejo)
- H*: Cantidad de agua por profundización de la capa activa (profundidad efectiva)
- Wc*: Cantidad de agua derivada del ascenso capilar
- Evt*: Evapotranspiración
- I*: Cantidad de agua perdida por percolación

Otros autores como Grassi (1998), plantean en el cálculo de la evapotranspiración, algunos coeficientes que dependen tanto del cultivo, como de la humedad presente en el suelo. En este sentido, plantea el balance por medio de la siguiente ecuación:

$$dn = d_{n-1} + Pe + R - ETr - Pp \quad (2)$$

donde:

- dn*: Lámina de agua en el suelo el día n (mm).
- d_{n-1}*: Lámina de agua en el suelo el día n-1 (mm).
- Pe*: Precipitación efectiva (mm).
- R*: Riego (mm).
- ETr*: Evapotranspiración real del cultivo (mm día⁻¹) ($ETr = ETo \times Kc \times Kh$).
- ETo*: Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día⁻¹).
- Kc*: Coeficiente de cultivo.
- Kh*: Coeficiente de humedad del suelo.
- Pp*: Percolación profunda (mm).

El coeficiente de humedad del suelo (*Kh*), se puede obtener mediante la relación dada por Jensen et al. (1971), citados por Rivetti (2006):

$$Kh = \frac{[\ln (Aw+1)]}{[\ln (101)]} \quad (3)$$

Siendo:

- Aw*: el porcentaje de agua disponible: relación entre la lámina de agua remanente (*dr*) en el suelo y la lámina total (*dt*) de agua disponible para la evapotranspiración ($(dr/dt) \times 100$).

El estudio de los balances hídricos es complejo por el hecho de que las variables consideradas no son independientes. Así, la cantidad evaporada depende evidentemente de la cantidad de agua disponible y cesa cuando el volumen de agua aportada por las precipitaciones está agotado (Durand-Dastes, 2012).

El uso de modelos sobre el transporte del agua en el suelo y el potencial hídrico en las raíces, ha conducido a proponer nuevas variables a considerar en el balance hídrico. Por ejemplo, Lafolie *et al.* (1991), señalan la importancia de considerar la redistribución del agua en el suelo durante la noche y el día, lo que alteraría el potencial hídrico del agua en el suelo. El efecto de la redistribución del agua durante la noche, podría aumentar el contenido de agua del suelo en la vecindad de las raíces, afectando la evapotranspiración durante el día (Bruckler *et al.*, 1991). Otros autores como Du Toit *et al.* (2002), han considerado incorporar la fluctuación del nivel freático en modelos como el CERES-Maize v3.0, para mejorar el balance y con ello la precisión del modelo.

2.1.3. Variables fisiológicas analizadas en estudios con maíz bajo estrés hídrico

El maíz por ser una planta con mecanismo de fotosíntesis C4, tiene ventajas sobre otras especies en términos de productividad potencial y rendimiento, siempre que disponga de las condiciones ambientales adecuadas para la operación del mecanismo (Ascencio, 2000). Por ello, el déficit hídrico afecta de manera directa el desarrollo de la planta, pudiendo evaluarse su efecto a través de variables como la tasa de crecimiento de órganos y su relación con variables específicas como la fotosíntesis, asociadas al rendimiento de la planta (Ascencio, 2000; Medrano y Flores, 2003) .

Otros factores como el efecto de capas compactadas en el suelo, también contribuyen a producir cambios en estas variables dentro de la planta de maíz, según lo reporta Grzesiak (2009), cuyos resultados muestran una reducción del 30% en el área foliar, con valores hasta de 0,33 m² y un promedio cercano a 5 hojas en plantas de 35 días de sembradas, en un suelo con densidad aparente de 1.58 Mg m⁻³. Este autor destaca asimismo, que la reducción en la materia seca fue más severa en la raíz que en la biomasa aérea.

Con relación a los estudios fisiológicos en maíz, Ascencio (2000) señala que la metodología del análisis del crecimiento ofrece ventajas para el análisis de la bioproductividad potencial

de las plantas y la jerarquización de la respuesta de diferentes genotipos bajo determinadas condiciones de medio ambiente y manejo. Esta metodología permite el uso de variables primarias simples como el peso seco y el área foliar que se pueden expresar a través de relaciones matemáticas simples como el Índice de Crecimiento Relativo (ICR) de los órganos y de la planta, el Índice de Asimilación Neta (IAN) y el Índice de Área Foliar (IAF), entre otros. Para esta autora, la limitante en el uso de estos índices en Venezuela, es la escasa información publicada a efectos de comparación con los genotipos que se cultivan en el país.

Entre los órganos afectados por el uso del agua dentro de la planta, es importante destacar la hoja por su influencia en la relación evaporación/transpiración, convirtiendo el área foliar en un parámetro relevante a tomar en cuenta en los estudios sobre estrés de humedad en muchos cultivos, especialmente en las investigaciones con maíz (Bänziger *et al*, 2000).

Así, el índice de área foliar (IAF) es frecuentemente usado para tal fin, el cual fue definido por Watson (citado en Elings, 2000), como el área de un lado del tejido verde de la hoja por unidad de área ocupada por el cultivo; es llamado índice de área foliar verde (IAF_v), para distinguirlo del índice de área foliar total (IAF_{tot}), el cual incluye el área de hojas verdes y senescentes. El IAF se relaciona en una función no lineal con la capacidad del cultivo para interceptar radiación fotosintéticamente activa y sintetizar carbohidratos para el crecimiento (Elings, 2000).

Existen relaciones matemáticas para estimar el área foliar en forma directa, las cuales consideran el ancho y el largo de las hojas de maíz. Algunos investigadores como Montgomery (citado en Elings, 2000) y Stewart y Dwyer (1999), han propuesto el uso de un factor de 0.75 y 0.74, respectivamente, que multiplicado por el largo y el ancho máximo de la hoja, permite estimar el área foliar individual de las hojas.

Pearce *et al.*(1975), relacionaron el área foliar de la planta (Y_p) con el área de la hoja más grande, a través de un factor (F) definido como:

$$F = \text{área de la hoja más grande}/Y_p \quad (4)$$

Por otra parte, Elings (2000) trabajando con genotipos tropicales de maíz en diferentes ambientes, reportó que la hoja más grande fue frecuentemente una de las tres hojas debajo

de la hoja de la mazorca. En dichos estudios, esta investigadora derivó una relación de este factor F , relacionándolo con el número total de hojas en las plantas (X_{tot}), de la siguiente forma:

$$F = 0,208 - 0,0052 X_{tot} \quad (5)$$

Dicha relación ha funcionado, para una combinación de genotipo - ambiente con X_{tot} entre 17 y 23, mostrando un $r^2 = 0,88$ y $P < 0,01$.

En nuestro país, Medina (1993) obtuvo resultados similares en el área foliar para el genotipo PB-8, no encontrando diferencias en la utilización de las hojas superior ó inferior adyacentes a la mazorca para el cálculo del índice.

Ascencio (2000) resalta que en campo, valores de IAF en maíz superiores a 0,6 no mostrarían saturación de luz, alcanzando niveles crecientes de eficiencia en la asimilación de CO_2 , donde se han medido valores de IAF hasta de 4,0 en la fase vegetativa, valor que estaría en el nivel de máxima eficiencia para la intecepción de luz del maíz en el trópico según Laffite (2001). No obstante, Yusuf (2006) obtuvo valores superiores a 5, en tratamientos con labranza profunda, donde tanto el desarrollo y la profundidad radical del cultivo como el almacenamiento y la disponibilidad de agua en el suelo fueron óptimos.

Analizando el efecto de la humedad sobre este parámetro, Sobrado (1986) trabajando con seis genotipos de maíz bajo condiciones de estrés hídrico, encontró una reducción del área foliar entre un 43% a 56%, mientras que la acumulación de materia seca alcanzó hasta el 48% en uno de los genotipos evaluados. Asimismo, el potencial de agua en la hoja, registró un mínimo de -1.5 MPa, 12 días después de suspender la suplencia de agua.

Algunos parámetros biométricos como la altura de planta y altura de la mazorca, con frecuencia son evaluados en estudios comparativos de maíz (Bolaños *et al.*, 1993). La altura de mazorca es un parámetro relacionado con variables de comportamiento agronómico como la resistencia al acame (García *et al.*, 2009).

2.2. Procesos relacionados con el almacenamiento y el movimiento del agua en el suelo

La mayoría de los procesos que envuelve las interacciones suelo-agua en el campo, ocurren bajo condiciones de no saturación, incluyendo la suplencia de agua y nutrientes para la planta; este flujo no saturado se relaciona con cambios en el estado y contenido de agua en el suelo, así como las relaciones complejas entre variables como succión, conductividad y fenómenos como la histéresis (Hillel, 1995).

La relación entre la distribución del tamaño de poros y el contenido de agua del suelo, es expresada utilizando el modelo capilar, mientras que las relaciones para explicar el movimiento de agua, han sido desarrolladas a través de diversas ecuaciones y modelos (Marsha; Childs, citados en Pagliai y Vignozzi, 2002), teniendo como principal limitación la asunción de la forma cilíndrica de los poros o la forma esférica de las partículas (Pagliai y Vignozzi, 2002).

En 1856, Darcy formuló la ley que relaciona la tasa de flujo de agua (Q) a través de una muestra saturada en forma proporcional con la diferencia de potencial entre sus extremos e inversamente proporcional con el largo de la columna (Childs, 1969). Esta ley puede ser expresada en la siguiente forma:

$$Q/t = (KS)(\phi b - \phi a)/l(6)$$

donde K es la conductividad hidráulica, S el área de la sección, $\phi b - \phi a$ la diferencia de potencial entre dos puntos y l el espesor.

Según Hartman (2005), esta ley ha sido extendida para determinar la dirección del flujo de agua vertical en una dimensión, en condiciones insaturadas bajo la siguiente forma:

$$q = -K(\theta) \left(\frac{dH}{dz} \right) (7)$$

Siendo: q el flujo, $K(\theta)$ la conductividad hidráulica, H el potencial hidráulico y z el potencial gravitacional, indicando el signo negativo que el flujo va en dirección al menor potencial. En esta expresión, la conductividad hidráulica es una función del contenido de humedad por lo

que es importante determinar la curva característica de humedad del suelo en muestras no disturbadas.

Considerando esta variables, los modelos numéricos para simular el flujo no saturado se basan en las propiedades hidráulicas del suelo, como la curva de retención de agua ($\theta(h)$), la función de conductividad hidráulica ($K(h)$), ó la curva de difusividad de agua del suelo ($D(\theta)$). No obstante, la dificultad en la medición de estas propiedades en campo ha impedido el desarrollo de modelos más precisos (Bohne *et al.*, 1993). Entre los modelos usados para calcular la función de conductividad hidráulica no saturada ($K(h)$), las funciones paramétricas de van Genuchten (1980) son las más usadas, las cuales asumen la siguiente forma:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (8)$$

$$K(h) = K_s \frac{[1 - |\alpha h|^{n-1} (1 + |\alpha h|^n)^{-m}]^2}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (9)$$

Siendo la ecuación 8, para determinar la retención de agua y la ecuación 9 para la conductividad hidráulica; donde θ_r es el agua residual, θ_s el contenido a saturación, α y n son parámetros de forma, $m = 1 - 1/n$, y ℓ es un parámetro de conectividad de poros estimado por Mualem (1996) en 0,5 como promedio para más de 50 suelos estudiados. Como se evidencia, en este modelo el contenido de humedad se relaciona en forma directa con la porosidad del suelo e inversamente con el potencial mátrico. A su vez, la conductividad hidráulica dependiendo del potencial mátrico, aumenta cuando hay mayor conectividad de los poros y se relaciona con la forma de los poros.

Hartman (2005), destaca que el modelo de van Genuchten es el que mejor se ajusta para explicar la relación entre el contenido de humedad del suelo y el potencial mátrico en diferentes suelos, pudiendo estimarse los parámetros independientes (θ_r , θ_s , α y n) por algoritmos matemáticos. Además, señala que otros modelos como el de Brooks y Corey (10) o el de Campbell (11) solo representan parte de la curva para valores de potencial de presión inferiores a la entrada del aire.

$$\theta = \theta_r + (\varepsilon - \theta_r) \cdot \left(\frac{hb}{h} \right)^\lambda \quad (10)$$

donde: ε = porosidad ($m^3.m^3$),

hb = presión de aire (cm H_2O),

λ = índice de tamaño de poro.

$$\theta = \varepsilon \cdot \left(\frac{Hb}{h} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (11)$$

donde: Hb = presión de aire (cm H_2O),

b = constante.

Para analizar el movimiento del agua del suelo hacia la raíz, Lafolie *et al.* (1991), propusieron un modelo bidimensional asumiendo la intersección de las raíces en un plano horizontal (paralelo a la superficie) y otro vertical (perpendicular a la superficie), el cual asume la ecuación de Richards (12) para calcular la distribución del agua del suelo en el tiempo y el espacio, bajo condiciones de suelo saturadas e insaturadas.

Ecuación de Richards:
$$C(\psi, \omega) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \text{div}([K(\psi, \omega)] \vec{\nabla} H) \quad (12)$$

Siendo ψ el potencial mátrico del agua del suelo, $H = \psi + z$ es la carga hidráulica; z es la profundidad (m), $C(\psi, \omega)$ es la capacidad hídrica (m^{-1}), ω es la variable espacial (m^3) y $K(\psi, \omega)$, la conductividad hidráulica.

En esta ecuación tanto la capacidad hídrica del suelo como la conductividad hidráulica dependen del potencial mátrico y de la variable espacial ω . La aplicación de este modelo por Bruckler *et al.* (1991), mostró la existencia de altos gradientes en el contenido volumétrico de agua, entre zonas compactadas y no compactadas.

Sobre el efecto de la movilidad del agua en suelos con capas compactadas, Alletto *et al.* (2006), han indicado que en suelos arcillosos existe una alta homogeneidad en dichas capas, con un contenido de humedad inmóvil que oscila entre 35% y 52%, lo que constituye una variable importante a considerar en la aplicación y la interpretación del modelo que se utilice para explicar el movimiento de agua en el suelo. De igual forma, es necesario evaluar la capacidad de retención de agua del suelo en función de la textura, ya que la arcilla puede almacenar hasta 200 mm de agua por metro de profundidad como agua disponible, mientras

la arena solo alcanza 80 mm m^{-1} , y donde entre 55-65% del agua disponible, se encuentra en un rango de potencial entre $-0,03$ y $-0,5$ MPa, donde la planta la puede disponer fácilmente (Bänziger *et al.*, 2000).

En investigaciones recientes, se ha usado la teoría de la percolación para deducir la estructura del sistema poroso, así como procedimientos de la geometría fractal, para relacionar el flujo de agua en el suelo con el flujo dentro de poros individuales y sus dimensiones fractales (Kutilek, 2005).

Por otra parte, en la planta el crecimiento de los órganos envuelve la absorción de agua por las células y la expansión de las paredes celulares como resultado de la presión hidrostática interna, lo que implica un balance en la movilización de nutrientes y metabolitos en las células (Boyer y Silk, 2004). El movimiento del agua entre células, se produce por gradientes de potenciales, que generan una fuerza de movimiento de zonas con alto potencial hidráulico hacia las zonas con menor potencial, reportándose en maíz un potencial de inducción de crecimiento en las hojas y tallos de $-0,4$ - $0,6$ MPa, el cual decrece cuando la hoja madura (Tang y Boyer, citados en Boyer y Silk, 2004). Este potencial se ajusta a lo indicado por Bänziger *et al.* (2000), quienes señalan que el agua del suelo contenida a potenciales entre $-0,5$ MPa y $-1,5$ MPa, aunque puede ser extraída por la planta, produce síntomas visibles de marchitez, por lo cual la exigencia para lograr la extracción genera cambios importantes en el potencial interno del agua en la planta, afectando su crecimiento.

Modelos más recientes como los propuestos por Naveed *et al.* (2012), han intentado predecir el contenido volumétrico del agua del suelo en función del contenido de las partículas de suelo, encontrando un mejor ajuste, cuando se relaciona específicamente, con el contenido volumétrico de todas las fracciones del suelo según el tamaño (materia orgánica, arcilla, limo y arena fina y gruesa).

2.3. La compactación y su relación con la porosidad y la dinámica del agua en el suelo

La porosidad del suelo, representa el espacio entre partículas y/o agregados y se relaciona con las fases líquida y gaseosa del mismo (Pagliai y Vignozzi, 2002). Según Guérif *et al.* (2001), la porosidad puede dividirse en dos partes: porosidad textural y porosidad estructural;

la textural es aquella que ocurre entre las partículas primarias y puede ser sujeta a expansión y contracción y es poco afectada por la acción mecánica del hombre, mientras que la estructural, consiste en espacios creados por el arreglo de los agregados y terrones producidos por el laboreo que comprende grietas, bioporos y macroestructura. Esta última es sensible a los factores de manejo como labranza, compactación y cultivo. Los poros estructurales son definidos como macroporos por Bronick y Lal (2005) y se refieren a aquellos con diámetro mayor a 30 μm ; sin embargo, para Pagliai y Vignozzi (2002) el límite inferior para estos es de 50 μm .

Greenland (citado en Pagliai y Vignozzi, 2002), clasifica los poros según su tamaño en aquellos con diámetro $<0,005 \mu\text{m}$, llamados poros de enlace; los comprendidos entre 0,005 - 0,5 μm , denominados poros residuales; los de rango entre 0,5 y 50 μm ó poros de almacenamiento y aquellos de 50 a 500 μm , llamados poros de transmisión. Los poros de transmisión serían los que drenan después de saturado el suelo hasta el punto de inflexión (S) de la curva de retención de humedad (Dexter, 2004). Pagliai y Vignozzi (2002), definen la capacidad de campo como la humedad remanente cuando los poros de transmisión han drenado.

La compactación de suelos, es definida como "el proceso por el cual las partículas de suelo son rearmados para reducir el espacio poroso y producir un estrecho contacto entre sí, por lo que aumenta la densidad aparente" (Soil Science Society of América, 2006). Por su parte, Dexter (2004), la define como la reducción del volumen de una masa de suelo dada, lo cual conlleva a una reducción en el volumen de poros.

La compactación del suelo altera su estructura, aumenta la densidad aparente y reduce la porosidad (Batey y McKenzie, 2006). Las operaciones continuas de cultivo en el campo con maquinarias y animales, conllevan a la compactación de las capas de suelo, especialmente el paso de maquinaria a una misma profundidad, lo cual reduce, principalmente, la macroporosidad (Gardner *et al.*, 1999). Este efecto es aún mayor, cuando se trabaja el suelo bajo condiciones inadecuadas de humedad, lo cual contribuye a incrementar el proceso de compactación (Hamza y Anderson, 2005). No obstante, Quiroga *et al.* (1999), consideran que para cualquier nivel de compactación es necesario definir el contenido de humedad de las muestras correspondientes a sus límites líquido, plástico y sólido, asociando el

comportamiento del suelo tanto a la fracción arcilla como al contenido de materia orgánica existente.

Richard *et al.* (2001), consideran que los macroporos son usualmente los que pierden o reducen su tamaño; por otra parte Pagliai *et al.* (2004), indican que una macroporosidad total de 10% es considerada como el límite inferior para una buena condición estructural, por debajo de la cual se considera un suelo compactado. Esta condición, no solo afecta las características físicas del suelo como el movimiento y almacenamiento del agua, también influye en la actividad orgánica al afectar variables como la difusión gaseosa (Bronick y Lal, 2005). Asimismo, puede producir un efecto de impedimento mecánico para la emergencia de la semilla y el crecimiento de la planta (Gardner *et al.*, 1999), especialmente reduciendo el crecimiento de las raíces tanto por el efecto físico de restricción a la compresibilidad del suelo, como por la menor disponibilidad del agua y el aumento en la tensión del agua remanente (Dexter, 2004).

Por su parte, Kulli *et al.* (2003) señalan que la compactación no solo cambia los parámetros mecánicos del suelo como la densidad aparente y la consolidación de la estructura, sino las propiedades de transporte del sistema poroso que alteran la infiltración y la disponibilidad de agua y aire para las plantas, aumentando además el flujo preferencial del agua dentro del perfil de suelo. En tal sentido, Lawrence-Smith *et al.* (2012), destacan que la compactación redujo el número de macroporos hidráulicamente efectivos, disminuyendo el flujo a través de ellos y alterando la forma de los mismos.

En suelos venezolanos, Pla (1983) ha indicado que la presencia de capas compactadas es una de las limitantes importantes en el movimiento interno del agua, ya que es un factor que determina entre otras cosas, el ascenso capilar, la capacidad de almacenamiento de agua de la capa superior a la zona compactada y se relaciona con la infiltración y la escorrentía superficial. Según este autor, su caracterización dentro del perfil de suelo, puede llevarse a cabo a través de diversos métodos, que incluyen la determinación de características físicas como la densidad aparente, la conductividad hidráulica saturada y algunos índices como la resistencia a la penetración y la distribución de poros. Por su parte, Lozano *et al.* (1997), trabajando con dos suelos del estado Portuguesa, diagnosticaron la presencia de capas

compactadas entre los 10 y 30 cm de profundidad, las cuales presentaban una conductividad hidráulica saturada menor a 2 mm h^{-1} .

Además de la presencia de capas compactadas, es de gran interés evaluar la distribución espacial de dicha capa en cuanto a profundidad, ya que este factor determina en forma directa el espesor del horizonte suprayacente y con ello la aplicación adecuada de prácticas, mecánicas que no vayan en detrimento de la capa subyacente a la zona compactada (Spoon, 2006). Al respecto, Ovalles (1991) resalta la importancia de evaluar la variabilidad en características físicas y químicas de los suelos, ya que, además de indicar las variaciones intrínsecas de las variables, permite establecer la distancia óptima de muestreo, así como determinar la orientación de las unidades experimentales para evaluaciones de campo.

Para Hamza y Anderson(2005), el manejo de la compactación del suelo, puede realizarse con la aplicación de diferentes técnicas y prácticas en forma apropiada, las cuales incluyen la adición de materia orgánica, el control de tráfico sobre el suelo, prácticas mecánicas como labranza profunda y rotación de cultivos. En este sentido, Batey y Mckenzie (2006) consideran que es necesaria una evaluación metódica y cuidadosa de la compactación ya que los cambios en las propiedades físicas que se generan, incluyen la resistencia a la penetración, el grado de agregación, la porosidad interagregados y la densidad aparente relativa.

En el caso de capas de suelo compactadas subsuperficialmente, se puede hacer uso de maquinaria especializada como el subsolador para romper o fraccionarla, para lo cual debe seleccionarse adecuadamente el equipo, el poder de tracción, la humedad del suelo, la profundidad, así como el complemento con otras prácticas de manejo (Spoon, 2006).

Motavalli *et al.* (2003), resaltan que la aplicación de labranza hasta los 30 cm de profundidad en suelos arenosos con capas compactadas, además de mejorar las condiciones físicas, contribuye de forma importante a mejorar la disponibilidad de nitrógeno y agua para el cultivo de maíz. No obstante, Bronick y Lal (2005) enfatizan la necesidad de una aproximación más holística en el uso y manejo de la tierra, utilizando prácticas de manejo que mejoren y promuevan la agregación del suelo.

2.4. Efecto de la compactación de suelos en el desarrollo radical de la planta de maíz

Según Gardner *et al.* (1999), el desarrollo de las raíces se altera cuando el suelo carece de poros de apropiado tamaño para su penetración, y aunque las raíces son capaces de agrandar los poros existentes, o crear nuevos poros, los pelos radicales solo pueden crecer en poros existentes con un diámetro igual o mayor de 10 μm . Estos autores señalan además que la máxima presión que puede ejercer una raíz en el suelo para ampliar o crear nuevos poros es de 3 MPa aproximadamente, y las raíces en zonas con impedimento mecánico, inhiben su crecimiento o lo redireccionan hacia áreas mejor estructuradas.

Boone y Veen (1982) trabajando en maíz, concluyeron que el límite crítico de impedimento mecánico para las raíces en este cultivo, es de 1,5 MPa medido con penetrómetro de punta cónica, una resistencia mayor reduce en más del 50% la tasa de crecimiento radical.

Por otra parte, Greacen (1986) ha indicado que el valor de presión crítica para el crecimiento de las raíces es 1 MPa, mientras que Misra *et al.* (Citados en Bengough y Mullins, 1990) señalan que la máxima presión axial que puede ejercer la raíz está entre 0,9 y 1,3 MPa. Greacen (1986) no obstante, reconoce la gran variabilidad de rangos de máxima presión que la raíz puede ejercer, la cual no solo varía entre especies, sino dentro de genotipos de una misma especie. Otros autores, enfatizan que el tamaño de la raíz tiene una influencia significativa sobre su habilidad para penetrar capas duras de suelo (Materechera *et al.*, 1992)

Debido a las dificultades experimentales, existen pocos estudios sobre la medición directa de la fuerza que ejerce la raíz en el suelo (Bengough y Mullins, 1990). Por esto, las evaluaciones de la fuerza ejercida por la raíz han sido realizadas de manera indirecta, usando parámetros como la densidad aparente del suelo (Hamza y Anderson, 2005) ó comparando la misma, con la resistencia del suelo al penetrómetro, asumiendo que se requiere una presión de 4 a 8 veces mayor que la raíz, la cual varía según el contenido de humedad del suelo (Whiteley *et al.*, 1981). Estudios recientes de Gao *et al.* (2012), prediciendo la compresión del suelo con el uso del penetrómetro, revelaron que esta varió con la textura, el contenido de materia orgánica y el contenido de agua inicial, el cual se evaluó en un rango de potencial mátrico no menor a -30kPa.

Con relación al efecto de la humedad sobre la compactación del suelo utilizando el penetrómetro, Whalley *et al.*(2005), estiman que un potencial mátrico de -250 kPa en suelos no estructurados impedirían la elongación de la raíz, por lo que sugieren que para suelos franco arenosos y franco arcillo limosos, las evaluaciones de resistencia a la penetración, usando el penetrómetro, se realicen con una potencial mátrico del suelo mayor de -100 kPa, descartando así, el efecto producido por el estrés hídrico.

Estudios realizados, utilizando el penetrómetro, ponen en alerta sobre las diferencias físicas entre éste y la raíz, destacándose la flexibilidad de la raíz, la cual sigue vías tortuosas, buscando la menor resistencia, y produciendo además durante su desarrollo, extracción de agua del suelo y secreción de sustancias mucilaginosas que generan cambios físico-químicos en el suelo, y reducen la fricción al paso de la raíz (Bengough y Mullins, 1990). No obstante, tales diferencias, estos autores concluyen que el uso del penetrómetro sigue siendo el mejor método disponible para estimar la resistencia física del crecimiento de la raíz en el suelo.

Pietola (2005), investigando con cebada y avena, señaló que el diámetro de las raíces no cambió en tratamientos de preparación de suelo, donde la resistencia al penetrómetro a profundidad de 10-25 cm, varió entre 1 y 1,5 kPa, con un contenido de humedad del 33% y un potencial mátrico de -100 kPa.

Por su parte, Grzesiak (2009) enfatizó que la compactación de suelo a un nivel donde la densidad aparente alcanzó $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$, produjo una disminución del número de hojas, área foliar y materia seca aérea y radical en maíz, relacionándolo con la sensibilidad de la arquitectura del sistema radicular al impedimento mecánico del suelo. Resultados similares habían sido reportados por Taboada y Álvarez (2008), quienes destacaron la reducción en la abundancia de raíces hasta en 60% en suelos compactados por la labranza convencional con relación a suelos tratados con cero labranza.

Konôpka *et al.* (2009), resaltaron la deformación de las raíces del maíz en forma de curvaturas por efecto de la compactación. Otros autores como Clark *et al.* (2003), han destacado los cambios en la anatomía de las raíces y su redistribución en el suelo ante la presencia de zonas compactadas. Al respecto, Bergamin *et al.* (2010), han señalado que la

compactación afecta el sistema conductivo de la planta de maíz, al reducir el cilindro vascular.

2.5. Labranza para el cultivo del maíz en suelos compactados

El 75% de la producción de maíz en Venezuela, se concentra principalmente en tres regiones: los Llanos Occidentales, los Llanos Centrales y el Valle Medio del Río Yaracuy, donde existen diferencias importantes en los sistemas de producción utilizados; sin embargo, es común el uso excesivo en el número de pases de rastra con el consecuente deterioro del suelo (Cabrera y Rodríguez, 1996). Esta práctica, contemplada dentro del sistema denominado convencional involucra en algunos casos el uso de arado de discos o de vertedera y se logra la inversión, mezcla y aflojamiento del suelo, permitiendo la incorporación de más del 90% de los residuos vegetales (Ungeret *et al.*, 1995; Marcano, 2000).

Aunque con este sistema se logra la incorporación de residuos y la eliminación de malezas, además de favorecer la incorporación de fertilizantes, cal y agroquímicos, no obstante, deja a los suelos potencialmente expuestos a erosión hídrica y eólica (Ungeret *et al.*, 1995).

Por otra parte, el uso de esta tecnología en suelos frágiles, debido a características texturales y estructurales susceptibles de erosión, unido a las condiciones climáticas agresivas y manejo no conservacionista, ha generado problemas de degradación conducentes a la formación de capas compactadas superficial y subsuperficialmente con la consecuente reducción de la infiltración y el almacenamiento de agua, entre otros efectos (Ohep *et al.*, 1994).

Entre los efectos que se generan cuando se aplica la labranza convencional con el uso excesivo de rastra, Dimanche y Hoogmoed (2002) citan el deterioro de la estructura por la pulverización del suelo; lo cual reduce la infiltración y promueve la ocurrencia de zonas secas dentro del perfil de suelo con reducciones en la humedad de más del 20% con relación al resto del suelo. Este efecto sobre la estructura, también influye en el flujo de calor en el suelo, afectando el régimen de temperatura, la tasa de reacciones químicas y la actividad biológica del mismo (Gardner *et al.*, 1999).

Florentino (1989), destaca que las operaciones de labranza alteran las propiedades físicas del suelo, en función del contenido de humedad a la cual se realizan y donde su aplicación inadecuada conduce al deterioro estructural del mismo, siendo la compactación uno de los efectos principales, el cual reduce la capacidad de almacenamiento de agua, aún en suelos con la misma clase textural. Asimismo, Unger *et al.* (1995), resaltan la importancia de considerar para la selección del implemento de labranza a utilizar, tanto el tipo de suelo como las condiciones climáticas, además del cultivo.

Estudios realizados en suelos de los Llanos Occidentales, con amplia tradición en la producción de cereales como el maíz, y sometidos a la labranza convencional de manera intensiva, han evidenciado un gran deterioro de su calidad física, que se manifiesta en procesos de compactación subsuperficial, reducción de la conductividad hidráulica y alta susceptibilidad a los procesos de erosión y sellado superficial (Lobo *et al.*, 1996; Lozano *et al.*, 2000). Estas condiciones no solo afectan la retención y el movimiento del agua disponible en el suelo, sino el desarrollo de las raíces de las plantas en forma directa e indirecta (Lobo *et al.*, 1996)

La experiencia de campo ha mostrado que el uso de implementos de labranza profunda como el arado y el big-rome en suelos con problemas físicos, mejora temporalmente las condiciones de porosidad y reduce la densidad aparente, lo cual se traduce en un mejor desarrollo del cultivo de maíz (Marcano y Landínez, 1997). En este sentido, Florentino (1989) encontró que la aplicación de arado en un suelo compactado mejoró también la profundidad de enraizamiento en maíz de 16 cm a 22 cm, afectando también la densidad de raíces en los primeros 10 cm. Sin embargo, Spoor, (2006), considera que el uso de estos implementos tradicionales produce cambios temporales de corto plazo en el suelo, con consecuencias más graves a futuro, si no se considera el efecto de los mismos tanto en la estructura como en la materia orgánica del suelo recomendando producir una perturbación mínima, orientada a producir fisuras en la capa compactada y evitar el levantamiento de la capa y el rearreglo del suelo. Asimismo, sugiere considerar la combinación de implementos y técnicas según la naturaleza de la compactación, para lo cual se requiere un adecuado diagnóstico de la situación inicial del suelo.

Eliminado: Es evidente

Eliminado: n

Eliminado: este autor

Según González (2003), el problema de compactación puede abordarse con medidas correctivas como la aplicación de subsolado y medidas complementarias como la siembra directa, mínimo laboreo y cubiertas vegetales, estas últimas con el objeto además de proteger el suelo y de incorporar materia orgánica. En tal sentido, Algayer *et al.* (2014), reconocen la actividad biológica como el principal factor que afecta la dinámica de la estabilidad de agregados en el corto plazo, la cual tiene estrecha relación con el contenido de agua del suelo.

Raza *et al.* (2005), indicaron un aumento superior al 10% en el rendimiento de maíz con el uso de subsolado para romper la capa compactada; dicho incremento estuvo asociado a un aumento en la absorción de nitrógeno. Este efecto sobre el aumento en la absorción de nitrógeno por la planta en suelo subsolado, también había sido reportado por Nevens y Reheul (2003), atribuyendo un efecto de mayor liberación del nitrógeno del suelo. Igualmente, estudios previos sobre el efecto de la compactación en el crecimiento de la raíz han resaltado los beneficios de la descompactación, mejorando tanto la distribución como la profundidad de las raíces (Unger y Kaspar, 1994).

Entre las prácticas alternativas Motovall *et al.* (2003), sugieren, el uso de rotación de cultivos con especies de enraizamiento profundo, recomendando además, el uso de labranza profunda en combinación con la incorporación de enmiendas orgánicas. Otros autores como Patil y Sheelavantar (2004), han encontrado que la incorporación de *Leucaena* (2.5 tha^{-1}) en el suelo, mejora la porosidad y aumenta la retención y conservación de la humedad del mismo.

Lipiec *et al.* (2003), recomiendan además del uso de prácticas mecánicas, la incorporación de microelementos y estimuladores de crecimiento para mejorar la penetrabilidad de las raíces en suelos compactados, especialmente en cultivos cereales. Asimismo, Smith *et al.* (2014), han señalado que el manejo de residuos en el largo plazo, unido a prácticas de manejo de agua, favorecen la estabilidad de los agregados, especialmente en la clase de 0,25-0,5 cm y 0,5-1,0 cm.

Jin *et al.* (2007), analizando el efecto de la aplicación de subsolador en suelos cultivados con maíz y trigo en China por más de 10 años, observaron que el sistema de no labranza por

cuatro años, seguido del subsolado, además de aportar beneficios al reducir la compactación y mejorar las condiciones físicas, aumentó los beneficios económicos, comparado con la aplicación anual de subsolador, el cual resultó con un alto costo económico. En artículos más recientes sobre este estudio, Jin *et al.* (2011), reportan que el sistema de no labranza, ha permitido mejorar tanto el porcentaje de macroagregados, como la macroporosidad en 8,1% y 43,3%, respectivamente, en la capa superficial del suelo (0-30 cm), en comparación con el sistema de labranza convencional. Además el aumento en la materia orgánica, nitrógeno y fósforo disponible, en los primeros 10 cm, han sido factores contribuyentes a mejorar los rendimientos, particularmente en años secos.

Por su parte, Logsdon *et al.* (2010), han indicado que en maíz, la reducción del contenido de agua en el suelo en la hilera es mayor que entre hileras, motivado a un mayor desarrollo radical, por lo que el sistema de siembra afectaría de forma importante, la eficiencia en el uso del agua y su demanda por el cultivo. Otros autores como Kumar *et al.* (2012), sustentaron los beneficios de la no labranza, en estudios de largo tiempo con maíz y otros cultivos, destacando una mayor estabilidad de los agregados al agua, lo cual favorece la retención y aumenta el agua disponible y los rendimientos. También Abdollahi y Munkholm (2014), han indicado que el uso de cobertura en varios ciclos de cultivo, redujeron la resistencia a la penetración en capas subsuperficiales a una profundidad de 20-40 cm, favoreciendo la exploración radical.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Selección y caracterización inicial del suelo

3.1.1. Descripción del área

La cuenca del Río Tiznados es una zona agrícola de gran importancia en la producción de maíz tanto para consumo industrial como para la producción de semilla en el estado Guárico, siendo la compactación de suelo, uno de los problemas generalizados y estudiados por largo tiempo. Por ello, se seleccionó la finca Morrocoicito orientada a la producción de semilla de maíz, ubicada en las coordenadas N-1.042.891 y E-654.837 del municipio Ortiz del estado Guárico y propiedad de la empresa Semillas Aragua (Figura 2).

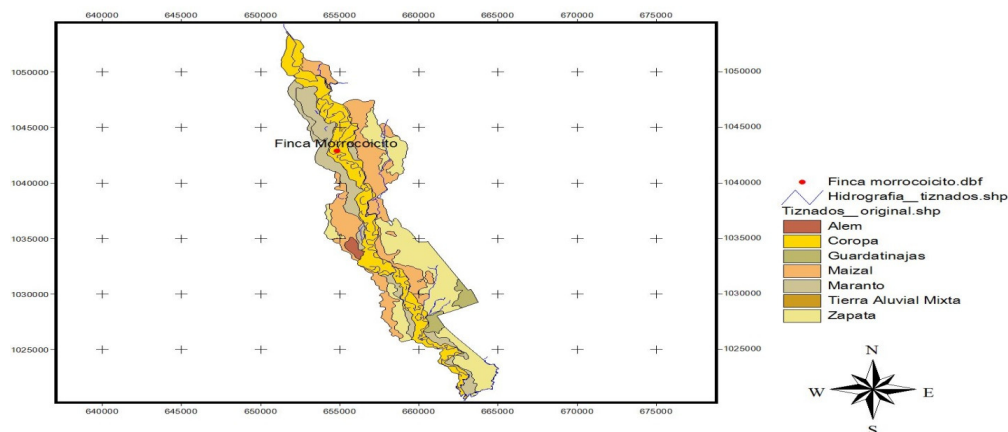


Figura 2. Ubicación relativa de la finca Morrocoicito dentro del Valle del Río Tiznados

Según la clasificación bioclimática de Holdridge (1947)(citado porEwel *et al.* (1976), se ubica en la zona de Bosque Seco Tropical con valores promedios anuales de precipitación, 1.132,9 mm; evaporación, 2.718,9 mm; temperatura media 27,2 °C; radiación solar, 376 cal/cm²; insolación media diaria de 7,3 horas; humedad relativa, media de 67%(SOCODEC-Venezuela, 2002).

El ensayo se estableció en el período de febrero a julio de 2006, en un lote de la finca con predominio de un suelo que según estudios previos pertenece a la Serie Coropa (Strebin *et al.*, 1967) representado por la familia Typic Haplustepts, francosa fina, mixta, isohipertérmica. Está conformado por sedimentos derivados de las formaciones geológicas El Chino, El Carmen y Santa Isabel, las cuales están compuestas por esquistos verdes metamórficos muy ricos en minerales ferromagnésicos básicos, de las cuales se han liberado elementos como calcio, magnesio y hierro muy abundantes en esta serie. La pendiente general del lote fue calculada en 1,5%, con una orientación en el sentido oeste-este.

3.1.2. Características físicas y químicas del suelo

La evaluación inicial del suelo se efectuó a través de una muestra compuesta de 12 submuestras a una profundidad de 0-20 cm, resultando entre las características químicas (Cuadro 1), un pH fuertemente ácido, nivel mediode materia orgánica (determinada por el método de Walkley y Black modificado, Heanes, 1984) y contenidos relativamente altos de nutrimentos disponibles (extraído por Mehlich 1, Mehlich, 1978), pudiendo relacionarse esto, con la continua aplicación anual de altas dosis de fertilizantes (> 600 kg ha⁻¹ de fórmulas comerciales) para la producción de maíz en este lote, lo que es usual en estos sistemas de producción (Casanova, 2000); asimismo, análisis previamente reportados, revelan un alto contenido de bases para este suelo, asociado al material parental rico en minerales ferromagnésicos básicos, lo cual le confiere a este suelo una alta fertilidad natural (Strebin *et al.*, 1967; SOCODEC-Venezuela, 2002).

Eliminado: alto

Cuadro 1. Características químicas del suelo.

Profundidad (cm)	pH agua 1:1	C.E. (dS m ⁻¹)	M.O. (%)	P	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
0-20	5,47	0,71	2,2 (medio)	86 (Alto)	1201 (Alto)	224 (M Alto)	147 (Medio)	192 (M Alto)

Eliminado: Alto

C.E.= conductividad eléctrica, M.O.= materia orgánica, P= fósforo, Ca⁺⁺= calcio, Na⁺= sodio, Mg⁺⁺= magnesio; K⁺= potasio, M Alto= muy alto.

Por otra parte, la distribución del tamaño de partículas del suelo en los primeros 20 cm de profundidad, indica una textura franca (Cuadro 2), destacando una alta proporción de limo, lo

cual se relaciona con la posición en el paisaje de la serie de suelo, catalogada como napa de limo de desborde (Strebin *et al.*, 1967; SOCODEC-Venezuela, 2002).

Cuadro 2. Distribución de tamaño de partículas y densidad aparente del suelo.

Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	Densidad aparente (Mg m ⁻³)
0-20	35	41	24	F	1,6

Destaca asimismo, la alta densidad aparente presente en la muestra, lo que hace presumir cierto grado de compactación, característica reportada en estudios previos (SOCODEC-Venezuela, 2002).

Resultados obtenidos con la tasa de infiltración (Figura 3), en tres sitios diferentes del área experimental, evidencian una fuerte reducción en los primeros 10 minutos hasta niveles inferiores a los 120 mm.h⁻¹, estabilizándose después de una hora en una infiltración básica (Ib) de 3-5 mm.h⁻¹. Este valor de Ib es semejante a los reportados por SOCODEC-VENEZUELA (2002) para este suelo, la cual es catalogada como lenta, lo que indica según Pla (1983), dificultad para la penetración de agua.

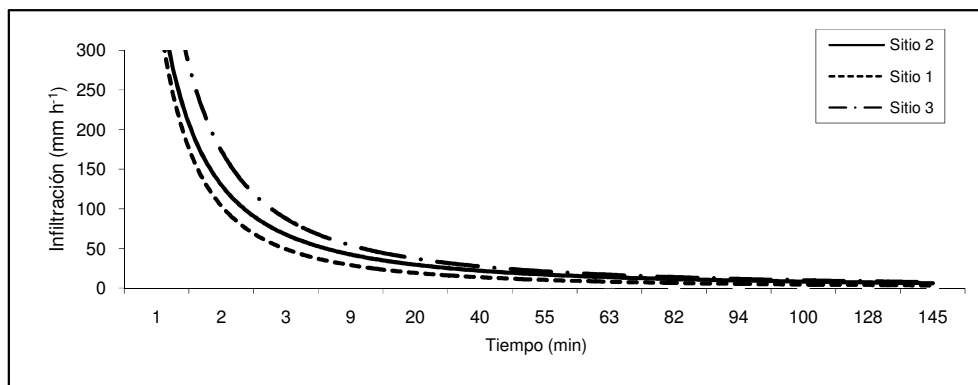


Figura 3. Tasa de infiltración del suelo en tres sitios del área experimental.

3.1.3. Curva característica de retención de agua del suelo

La determinación de la curva característica de retención de agua por capas de suelo, mostró que no existen diferencias importantes en el comportamiento entre las mismas (Figura 4). La

tendencia, fue similar en las tres capas, con un menor contenido de agua en la capa superficial (0-12 cm) evidente cuando el potencial mátrico fue bajo. En saturación, el contenido volumétrico de agua para la capa superficial fue de 37%. Asimismo, si asumimos el contenido de agua a -10 kPa como equivalente a la capacidad de campo para suelos de textura franca (Florentino, 1998), este alcanzó un valor de 33% ($v v^{-1}$), mientras en el punto de marchitez permanente (-1500 kPa) estuvo en 12% ($v v^{-1}$). Estos valores indican, un contenido de agua aprovechable para el cultivo, de 21%, lo que equivale a 2.59 cm de lámina para la capa superficial.

Eliminado: i

Eliminado: en

Con formato: Superíndice

Eliminado: representa

Eliminado: un 57%

Eliminado: del agua contenida en saturación, el cual se considera como un nivel medio según Florentino (1998)

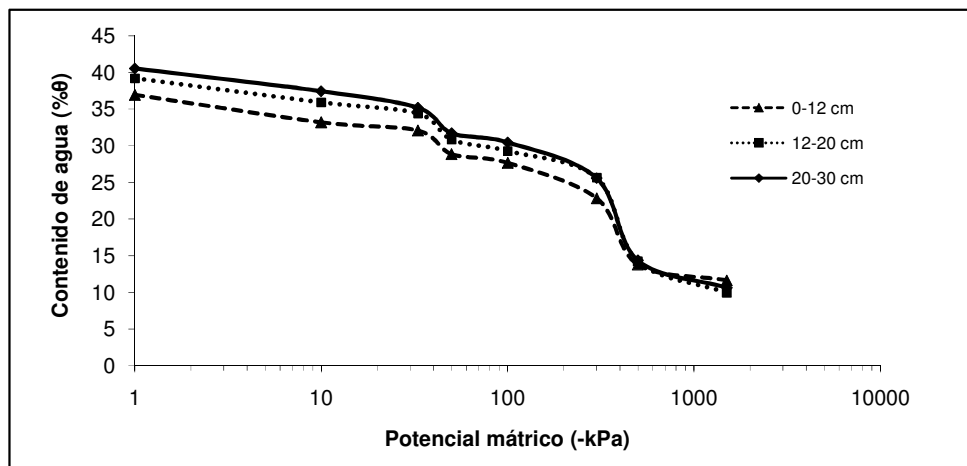


Figura 4. Curva característica de retención de agua del suelo bajo estudio.

Resalta en la forma de la curva, una reducción brusca en el contenido de humedad, cuando el potencial se reduce de -300 a -500 kPa, significando un cambio brusco de valores de 24% a 14% de agua volumétrica, siendo este último cercano al punto de marchitez. Esto significa que poco más del 50% del agua aprovechable del suelo, estaría fácilmente disponible para las plantas (Bänziger *et al.*, 2000). El contenido volumétrico de agua en este punto de inflexión de la curva (23%θ), estaría asociado según Dexter (2004) al contenido de humedad óptimo para la labranza, siendo la humedad almacenada por encima de este punto la contenida en los poros estructurales del suelo, mientras la humedad por debajo del mismo, sería principalmente contenida en los poros texturales. Además, la pendiente en el punto de inflexión sería característica, relacionada con la microestructura del suelo y con el grado de

Eliminado: alcanzando

Eliminado: s

degradación física del suelo. Esto podría significar problemas para la adecuada absorción de agua por el cultivo al agotarse el 50% del agua aprovechable.

Además, algunas características del suelo como la textura y la estabilidad estructural, pueden afectar el comportamiento hídrico del suelo, alterando tanto el punto de inflexión como su pendiente (Dexter, 2004), por lo que el manejo del suelo, sería una variable importante a considerar, ya que puede afectar de forma significativa tanto la estructura como su estabilidad.

3.1.4. Caracterización climática

La zona en general, se caracteriza por una marcada estacionalidad climática (Figura 5), con alta evaporación durante todo el año y un máximo en el mes de marzo. La temperatura promedio es de 27°C, con una tendencia similar a la evaporación. Estos datos indican además, que la precipitación en la zona se inicia entre los meses de marzo y abril, culminando a finales de año; la máxima precipitación ocurre entre los meses de mayo a octubre.

La precipitación registrada en el ensayo durante el período de evaluación, fue incluida de forma comparativa, resaltando una tendencia similar a la reportada en la estación de Río Verde, especialmente durante el mes de mayo, aunque tanto el mes de abril como junio, estuvieron muy por debajo de la tendencia mostrada en años previos, evidenciando un año más seco.

Con el fin de caracterizar algunas variables climáticas, se utilizaron datos precedentes de la estación Río Verde, calculando la Evapotranspiración de referencia (ET_o) por el método de Thornthwaite, usando el programa CIRH (Santibañez, 2005). De igual manera, se calculó el Índice de Fournier Modificado (IFM) propuesto por Arnoldus (1980) y el Índice de Concentración de la Precipitación (ICP), propuesto por Oliver (1980) para caracterizar la agresividad climática y la distribución de la precipitación, respectivamente.

El Índice de Fournier Modificado (IFM) se obtuvo de la siguiente fórmula:

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$$

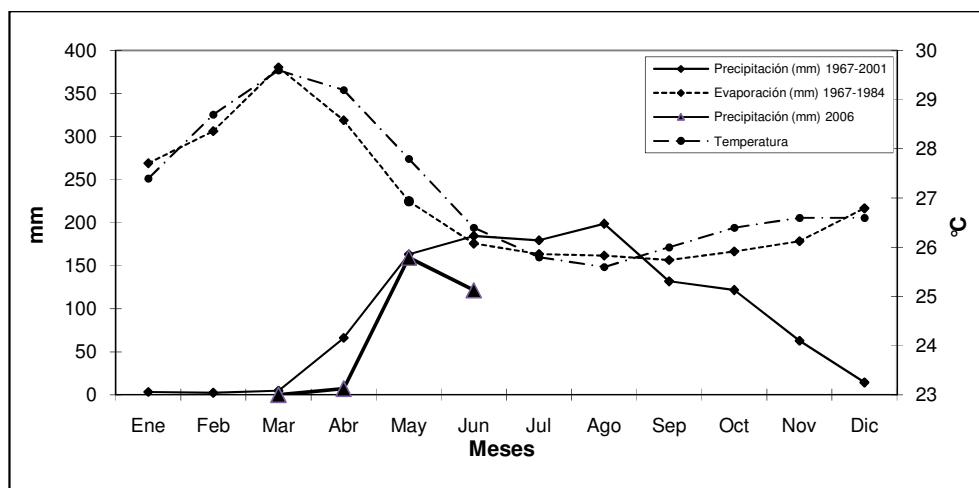


Figura 5. Resumen de datos climatológicos de la estación climática Rio Verde (1967-2001) y precipitación medida en el ensayo (2006).

Además, se calculó el Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) mediante la siguiente ecuación:

$$ICP = 100 \frac{\sum p_i^2}{P^2}$$

En ambas ecuaciones p (mm) es la precipitación mensual y P es la precipitación anual (mm).

Los cálculos realizados permitieron comparar la ET_o y $ET_o/2$ con la precipitación (Figura 6) indicando que se trata de una zona con un régimen hídrico subhúmedo, es decir, con 5 a 6 meses secos (se considera que un mes es seco cuando la precipitación es menor que la $ET_o/2$). Por otra parte, según el criterio de Brito y Brito (1983), el período húmedo comienza a mediados de abril cuando la precipitación supera a la $ET_o/2$ y finaliza en noviembre, denotando suficiente amplitud para efectuar las labores agrícolas desde la preparación de suelo y la siembra del cultivo de maíz, hasta su cosecha en la zona.

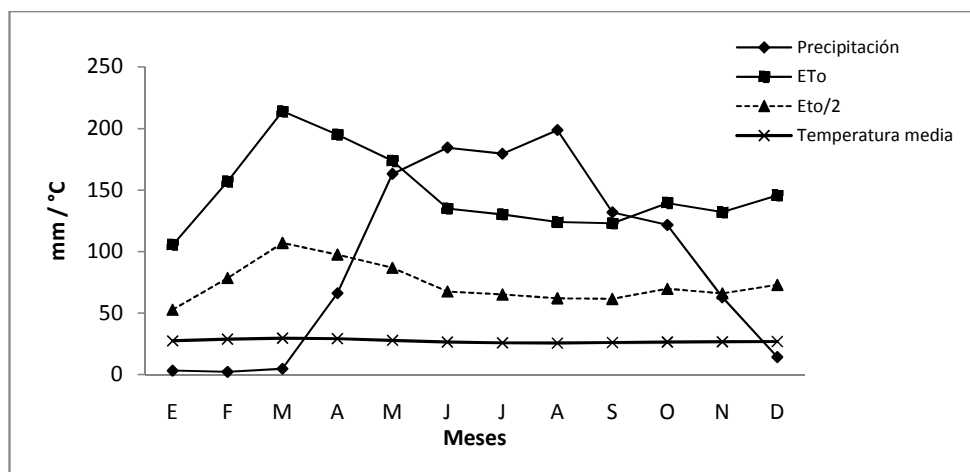


Figura 6. Resumen de las variables ETo y ETo/2, en comparación con la precipitación según los datos de la estación de Río Verde (1967-2001).

Por otra parte, el cálculo de Índice de Fourier modificado (IFM), resultó en un valor de 152,7, indicando que la zona tiene una alta agresividad climática ($120 < IFM < 160$) de acuerdo a la clasificación de Arnoldus (1980), mientras que el Índice de Concentración de la Precipitación (ICP), arrojó un valor de 13.5, lo que mostró una distribución de las lluvias moderadamente estacional ($10 < ICP < 15$), según la clasificación de Oliver (1980), tal como lo señalan Lobo *et al.*, (2010). Estos índices corroboraron que la zona posee un clima que potencia la degradación de suelo, especialmente cuando esta sin cobertura.

Cabe destacar, que la preparación del suelo en la zona, se ejecuta en función de la caída de las primeras lluvias fuertes a inicios del mes de mayo, aunque se efectúan pases previos de rastra para incorporar la maleza en condiciones de baja humedad a finales del año anterior. La siembra de genotipos para la producción de semillas híbridas de maíz, tanto en esta finca como en la región, se caracteriza por la aplicación de altas dosis de fertilizantes durante el ciclo ($>600 \text{ kg ha}^{-1}$) y prácticas convencionales de laboreo que incluyen más de seis (6) pases de rastra en los últimos quince años.

3.1.5. Evaluación previa del grado de compactación del suelo

Con el objeto de evaluar la presencia de capas compactadas en el suelo, se utilizó el penetrómetro de impacto (Nacci y Pla, 1991) para medir la resistencia a la penetración en tres sitios del área experimental, lo cual fue realizado a las profundidades de 5, 10, 15, 20 y 25 cm, a un contenido de humedad promedio en el suelo de 0.05 g g^{-1} .

Los resultados iniciales, indican un incremento notable de la resistencia a partir de los 10 cm de profundidad con valores ligeramente superiores a 1 MPa, alcanzando valores máximos a 15 cm de profundidad (Figura 7) entre 1,8 y 1,9 MPa. A los 20 cm, disminuyó la resistencia a valores ligeramente superiores a 1 MPa en todos los casos, y menores a este valor a los 25cm.

Este patrón fue similar en los sitios evaluados, significando uniformidad en el terreno con relación a esta variable. La mayor resistencia se alcanzó en el sitio 3 a los 15 cm, con un valor de 1,9 MPa. Estos valores registrados, se ajustan a resultados previos reportados para esta serie de suelo, según los cuales se indica la presencia de una capa compactada entre los 10 y 15 cm de profundidad, atribuida al efecto del sistema convencional de preparación de suelo aplicado en la zona, donde predomina un alto número de pases de rastra a esta profundidad (SOCODEC-Venezuela, 2002).

3.1.6. Presencia de capas compactadas y su distribución en el suelo

Mediante un muestreo en cuadrícula, se realizó una evaluación más detallada de la resistencia a la penetración en el área experimental, registrando el contenido gravimétrico de humedad en cada caso. Esto permitió evaluar tanto la existencia de capas compactadas en el perfil de suelo como su distribución espacial. Para ello, se dividió el área total del ensayo ($\sim 2.280 \text{ m}^2$) en cuadrículas, separando el eje de las abscisas en unidades equidistantes de 5 metros, y el de las ordenadas cada 4 metros.

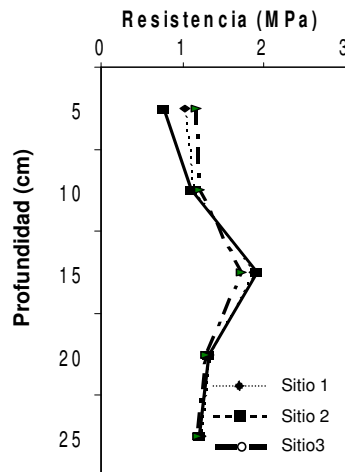


Figura 7. Resistencia a la penetración promedio, en tres sitios del área experimental.

Inicialmente, se registró la profundidad de la capa utilizando un penetrómetro de reloj marca DICKEY-John Corp., con una punta cónica de ½ pulgada y midiendo la profundidad de penetración en centímetros cuando se alcanzó una presión de 1,38 MPa (200 psi), equivalente al rango en el cual crecen bien la mayoría de los cultivos, según el fabricante. Paralelamente, se midió la resistencia a la penetración con un penetrómetro de impacto siguiendo la metodología de Nacci y Pla (1991), a las profundidades de 10, 15 y 20 cm en cada punto, tomando muestras de suelo, para la determinación gravimétrica de humedad en cada sitio.

La figura 8, muestra los resultados de la evaluación a la profundidad de 15 cm, para la condición de humedad promedio de 0,05 g g⁻¹. Estos indican una alta resistencia bajo esta condición, predominando los valores superiores a 1,2 MPa, los cuales serían limitantes para el desarrollo de las raíces de maíz, según Greacen (1986); aunque Delgado *et al.* (2008), han sugerido como valor limitante 6,04 MPa, a partir del cual decrece el volumen específico de raíces para este cultivo.

Con formato: Espacio Antes: 18 pto

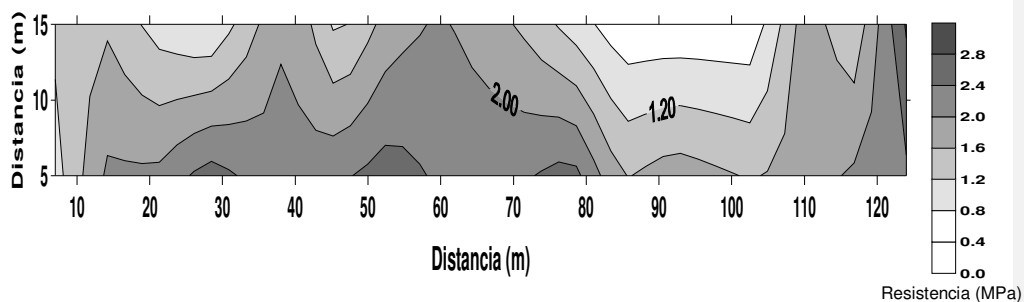


Figura 8. Distribución de la resistencia a la penetración del suelo a la profundidad de 0-15 cm, a un contenido de humedad (g g^{-1}) de 0,05.

Posteriormente, se repitió la evaluación a las mismas profundidades, pero con un contenido de humedad promedio de $0,12 \text{ g g}^{-1}$. Los resultados a la profundidad de 15 cm, a este contenido de humedad muestran una reducción general de los valores de resistencia mecánica (Figura 9), predominando en la mayor parte del área experimental, valores inferiores a 0,4 MPa, los cuales están en el rango de tolerancia para el crecimiento de las raíces en general (Bengough y Mullins, 1990) y especialmente en el rango para la elongación de las raíces del maíz, reportado por Bengough y Mullins (1991) entre 0,26 y 0,47 MPa.

Estos resultados, revelan las restricciones mecánicas en este suelo, para el crecimiento de raíces después de los 15 cm de profundidad en condiciones secas, las cuales se reducen en condiciones de mayor humedad. Por otra parte, se observó una mayor uniformidad en la distribución de los valores en el área evaluada.

No obstante, aunque las raíces tengan mecanismos para solventar este impedimento físico, como reorientar su crecimiento en forma lateral (Greacen, 1986), podrían manifestarse diferencias entre los genotipos, derivadas tanto de la arquitectura de la raíz, como de su diámetro y de la tendencia a doblarse o desviarse (Clark *et al.*, 2003).

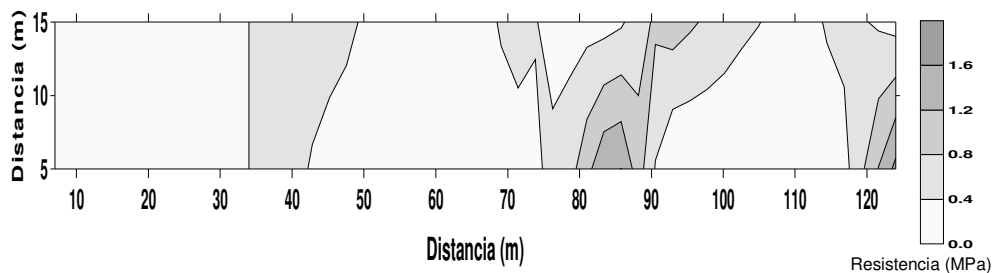


Figura 9. Distribución de la resistencia a la penetración del suelo a la profundidad de 0-15 cm, a un contenido de humedad (g g^{-1}) de 0,12.

Con el objeto de evaluar la distribución de la capa compactada en el área experimental, se usó el penetrómetro de reloj para evaluar dicha profundidad. Para ello se redujo el largo del área inicial en 20 metros realizándola en una superficie más ajustada al área final de evaluación (100m), a un contenido de humedad de 0.05 g g^{-1} . El resultado mostró que la capa compactada se distribuía a partir de una profundidad que varió entre los 8 y 15 cm (Figura 10), con un promedio general de 11,26 cm de profundidad, y con valores máximos concentrados en los bordes del área experimental, lo cual se ajusta a los resultados del análisis realizado con el penetrómetro de impacto, donde a partir de los 10 cm aumenta progresivamente la resistencia, alcanzando valores extremos a los 15 cm.

Tomando como base estos resultados, se asumió que la capa compactada se distribuyó a partir de los 12 cm, ya que más del 80% del área estaría representada a esta profundidad. Asimismo, se estimó un espesor de unos 8 cm aproximadamente, asumiendo una profundidad máxima de 20 cm, por la reducción observada de la resistencia a partir de esta profundidad (Figura 7).

Además de la limitante mecánica en esta capa, las condiciones de baja proporción de poros (especialmente macroporos), debería tomarse en cuenta el efecto en la restricción para el drenaje, así como problemas para la adecuada aireación del suelo.

Eliminado: Como se observó inicialmente (Figura 6), después de los 15 cm la resistencia se reduce aunque con valores aún superiores a 1 MPa a los 20 cm.

Eliminado: puede

Eliminado: ar

Eliminado: si

Eliminado: mos

Eliminado: su

Eliminado: .

Eliminado: puede tener

Eliminado: un

Eliminado: reducir

Eliminado: la

Eliminado: ,

Eliminado: lo que afectaría negativamente el crecimiento de las raíces, como ha sido señalado por Gardner *et al.* (1999).

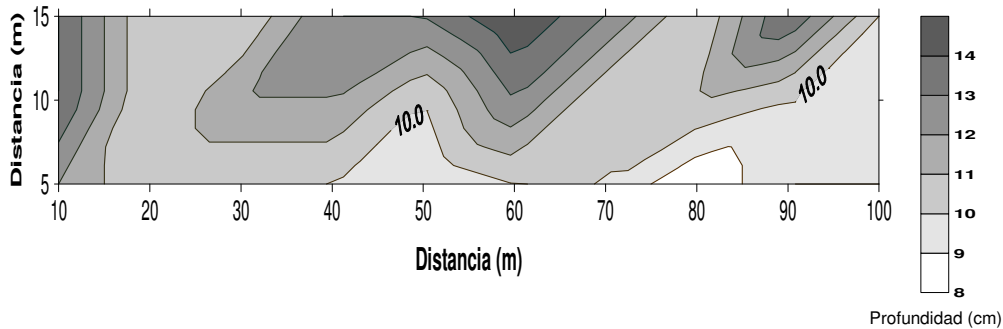


Figura 10. Distribución de la profundidad de la capa compactada utilizando el penetrómetro de reloj a un contenido de humedad (g g^{-1}) de 0,05.

3.1.7. Propiedades físicas del suelo por capas y su comportamiento hídrico

El análisis de distribución de tamaño de partículas por capas de suelo, indica que presenta una textura franca en los primeros 12 cm y franco arcillosa en las capas más profundas (Cuadro 3); sin embargo, la diferencia entre esta primera capa y la subyacente es de apenas un 3% en el contenido de la arcilla, por lo que se esperaría un comportamiento físico poco diferenciado en cuanto a la textura. Tales resultados coinciden con los presentados en estudios previos para esta serie (Strebín *et al.*, 1967; SOCODEC-Venezuela, 2002), la cual estaría compuesta por familias de textura franca, franca limosa y franca arcillo limosa en la parte superficial.

El fraccionamiento de las arenas muestra cierta similitud entre las capas, destacando un mayor contenido de arenas finas y muy finas en la capa superficial (Cuadro 3), el cual al sumarse a las partículas de limo, le confieren un predominio de partículas con baja cohesión (48,8%) altamente susceptibles a la separación por humedecimiento (Pla, 1983). Al calcular el índice de separabilidad de las partículas (Cuadro 4), se obtuvieron valores en un rango entre 0,49 y 0,66 según las capas, indicando una clase moderada para este índice, lo cual se relaciona según Florentino (1998), con una moderada susceptibilidad a la formación de sello o costra superficial. El predominio de estas fracciones, no favorecen la agregación en el suelo (Bronick y Lal, 2004) y afectan negativamente tanto la retención de humedad, como su movilidad a través del suelo, por el potencial colapso de la porosidad estructural (Dexter, 2004).

Eliminado: al

Eliminado: erse

Cuadro 3. Distribución de tamaño de partículas del suelo por capas.

Profundidad (cm)	Arena muy gruesa (2 – 1 mm)	Arena gruesa (1 – 0,5 mm)	Arena media (0,5 – 0,25 mm)	Arena fina (0,25 – 0,10 mm)	Arena muy fina (0,1 – 0,05 mm)	Arena total (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural
0-12	7,30	10,25	9,59	6,18	2,68	36,00	40,00	24,00	F
12-20	8,17	8,82	9,35	4,24	1,42	32,00	41,00	27,00	FA
20-30	8,72	7,80	7,91	3,45	2,92	30,80	39,20	30,00	FA

Con formato: Espacio Después: 6 pto

Con relación a las condiciones estructurales, resalta la mayor densidad aparente en las capas de 12-20 cm y 12-30 cm (Cuadro 4), en comparación con la capa superficial, presentando un valor de 1,78 y 1,8 (Mg m^{-3}) respectivamente, que según la clase textural de la capa de suelo, es indicativo de un nivel de degradación muy alto por compactación (Florentino, 1998), derivado de una importante reducción del espacio poroso (Hamza y Anderson, 2005; Dexter, 2004), especialmente el espacio poroso de aireación.

La conductividad hidráulica saturada presenta valores de 0,05 cm h^{-1} en la capa superficial y menor a 0,02 en las más profundas, los cuales son muy bajos en forma general (Cuadro 4). Estos valores, son similares a los reportados para la capa de 0 - 20 cm en suelos de la misma serie (SOCODEC-VENEZUELA, 2002). Destaca la reducción drásticamente de esta característica en la capa de 12-20 cm, alcanzando niveles inferiores a 0,006 cm h^{-1} , los cuales restringen severamente el movimiento interno del agua, según Pla (1983).

Destaca asimismo, la baja proporción de poros en todas las capas (Cuadro 4), con una porosidad total inferior al 40% en la capa superficial y menor al 37% en las capas subyacentes, los cuales se consideran según los valores críticos indicados por Florentino (1988) según el grupo textural de este suelo, con un rango de severidad en la degradación física moderada en la capa superficial y muy alta en las capas subyacentes. Esta situación se corresponde con la elevada densidad aparente observada especialmente en la capa de 12-20 cm y la baja proporción de macroporos encontrada, la cual no alcanza el 10% en ninguna de las capas de suelo, con el consecuente predominio de los microporos, que según lo indicado por Paglai y Vignozzi (2002) sugiere una elevada compactación.

Tales características, además de indicar la alta degradación física, representarían problemas para el adecuado desarrollo de las raíces de las plantas (Gardner *et al.*, 1999), al requerir de

altas presiones para penetrar en el suelo (Greacen, 1986), o la necesidad de redireccionar el crecimiento (Gardner *et al.*, 1999). Por otra parte, la alta proporción de microporos con relación a los macroporos genera un desbalance entre la aireación y la retención de agua en el suelo, favoreciendo condiciones anaeróbicas o de limitada aireación aún a capacidad de campo, reduciendo el desarrollo de las raíces, especialmente en condiciones de suelo con limitantes mecánicas como la compactación (Bengough y Mullins, 1990) .

Cuadro 4. Características estructurales del suelo.

Profundidad (cm)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Microporos (%)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Ks (cm h ⁻¹)	ISP	Módulo de Ruptura (kPa)
0-12	38,23 ± 1,04	6,72 ± 0,61	31,51 ± 1,28	1,65 ± 0,06	0,05 ± 0,01	0,49	423 ± 34,4
12-20	33,86 ± 0,90	4,82 ± 0,24	29,05 ± 0,85	1,78 ± 0,04	0,006±0,006	0,58	646 ± 15,3
20-30	37,02 ± 1,95	4,98 ± 0,36	32,04 ± 2,01	1,80 ± 0,03	0,019±0,008	0,66	673 ± 26,8

Ks= conductividad hidráulica saturada, ISP= índice de separabilidad de las partículas.

Otro índice a resaltar es el módulo de ruptura, resultando el suelo con valores altos en las tres capas (Cuadro 4), donde los valores extremos se muestran en las capas más profundas del suelo. Tal evidencia, demuestra una alta cohesión en seco, con una alta resistencia a la roturación en seco (Pla, 1983), conllevando a la necesidad de ejercer presiones extremas por las raíces, para su crecimiento y afectando su extensión radical, como lo indica Greacen (1986).

Al analizar los resultados de la distribución de los agregados estables al agua en las tres capas de suelo (Figura 11), se evidenció que más del 80% de los mismos, está en un rango con diámetro menor a 0,25 mm en todas las capas. No obstante, la capa superficial (0-12) mostró un porcentaje de agregados mayores a 0,25 mm alrededor del 15%, en comparación con las demás capas cuyos valores estuvieron cercanos al 10%. Este resultado, sugiere una baja estabilidad de la estructura de este suelo al humedecerse, indicando un deterioro en su estabilidad estructural según Pla (1983), lo que estaría asociado con una muy alta severidad de la degradación del suelo (Florentino, 1998).

Eliminado: <#>Estabilidad de los agregados al agua¶

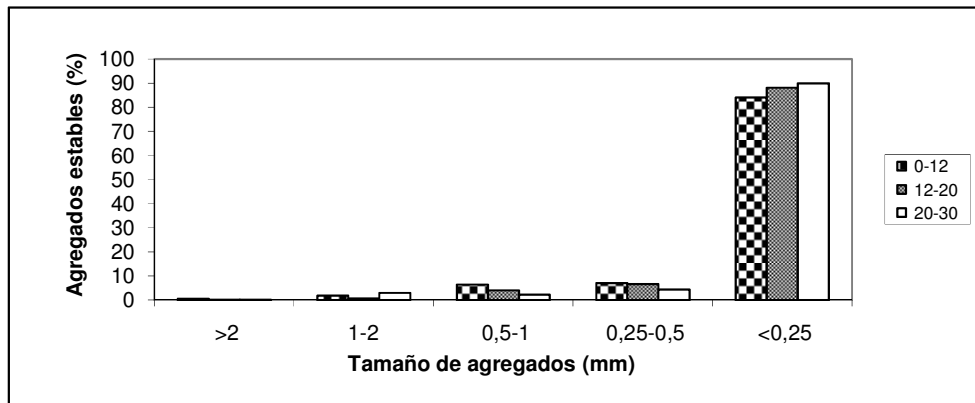


Figura 11. Distribución porcentual de los agregados estables al agua por el método de Yoder modificado, para cada capa de suelo.

Con formato: Espacio Después: 18 pto

Esta característica, puede relacionarse con el índice de separabilidad de las partículas calculado (Cuadro 4), según el cual el predominio de partículas con baja cohesión, favorecería su separación ante agentes externos como el agua y la acción física de la maquinaria agrícola (Spoor, 2006; Batey y McKenzie, 2006). Asimismo, el predominio de microagregados después del humedecimiento estaría afectado por la presencia de la fracción de partículas de arcilla ($< 2 \mu\text{m}$) y fracciones más estables de la materia orgánica como los ácidos húmicos (Ruiz, 1995; Rondón y Elizalde, 1997). Sin embargo, aunque tanto la agregación como su estabilidad dependen de la cantidad de materia orgánica del suelo (Lado *et al.*, 2004), la calidad de la misma parece tener un mayor efecto en esta característica (Pulido-Moncada *et al.*, 2009).

El colapso de la estructura del suelo con el humedecimiento, reduce la macroporosidad y con ello tanto la capacidad de almacenamiento de agua disponible como su movimiento, promoviendo además la compactación (Lal, 2001). La baja estabilidad estructural en suelos de textura media estaría más asociada al tipo de arcilla y el bajo contenido de carbono orgánico según Bronick y Lal (2005), aunque por la alta retención y alto contenido de cationes presentes en el suelo (Cuadro 1) que son factores de agregación, la baja estabilidad podría asociarse a la fuente de carbono presente en el suelo, más que al tipo de arcilla (Ruiz, 1995).

Este resultado, podría justificar el comportamiento similar observado en la curva de retención de agua para las capas de suelo analizadas (Figura 4), donde el colapso estructural en la capa superficial, tiende a reducir el espacio poroso en el suelo y generar un comportamiento similar al observado en las capa con mayor compactación, con un punto de inflexión y una pendiente parecida en este punto, para las tres capas.

3.1.8. Redistribución del agua en el suelo

En los sitios donde se evaluó la infiltración, se analizó la variación de la humedad del suelo hasta las 108 horas después de inundado. Esta evaluación realizada por capas hasta una profundidad de 30 cm, indicó ciertas variaciones entre los sitios, a diferencia de la infiltración ya señalada. En la capa superficial (0-12 cm) se observó una pendiente leve a través del tiempo (Figura 12a), donde la humedad remanente en el suelo expresada en forma volumétrica después de las 48 horas estuvo entre 24% y 30%, mientras los valores a las 108 horas oscilaron entre 15% y 19% en los sitios analizados. A las 48 horas, que es el tiempo estimado para establecer la humedad a capacidad de campo, se obtuvo un valor promedio de 28% de humedad, el cual se ubica cerca del límite bajo, para agricultura de secano, según Pla (1983). El sitio 3, ubicado en la parte más alta del terreno alcanzó el contenido más bajo a las 48 horas (24,5%), indicando una mayor movilidad interna en este sitio.

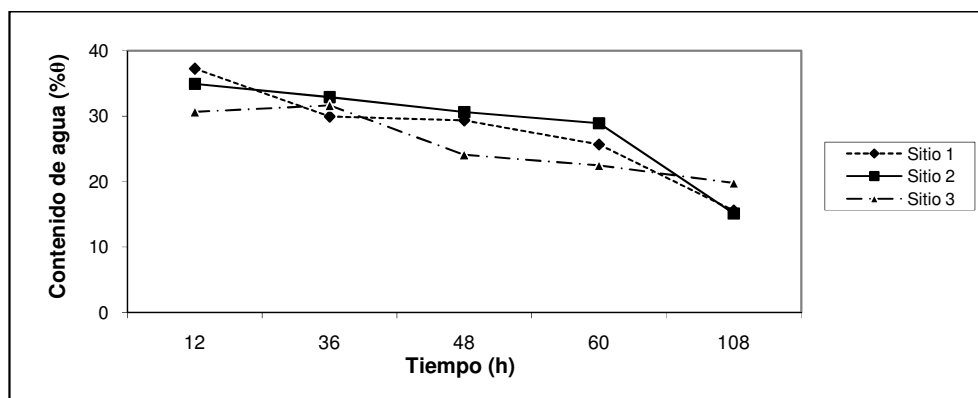


Figura 12a. Variación del contenido de humedad del suelo en la capa superficial(0-12 cm), después de saturación en función del tiempo.

El análisis permite deducir que las pérdidas de agua por drenaje interno en esta capa superficial son bajas y se mantiene una humedad relativamente estable por más de 60 horas.

La capa de 12-20 cm, alcanzó niveles de humedad máximos de 30%, manteniéndose poco variable a través del tiempo en todos los sitios (Figura 12b). Por otra parte, las variaciones a través del tiempo, no se correspondieron a las observadas en la capa superficial, con una pendiente casi nula a través del tiempo. La humedad en esta capa, pareció mantener un equilibrio en el tiempo, con variaciones porcentuales en cada sitio de alrededor del 2% según cada medición. Las diferencias en el contenido de humedad observada entre los sitios, en especial el sitio 1 indicaría una menor capacidad de almacenamiento, derivada de una mayor compactación.

Igual comportamiento se observó en la capa de 20-30 cm (Figura 12c), con oscilaciones de la humedad del 2%, similares a la capa de 12-20cm, aunque con valores de humedad ligeramente superiores a la misma. Cabe destacar, que en esta capa tampoco se alcanzaron niveles de humedad comparables a la capa superficial en las primeras horas, indicando una menor capacidad de almacenamiento de agua.

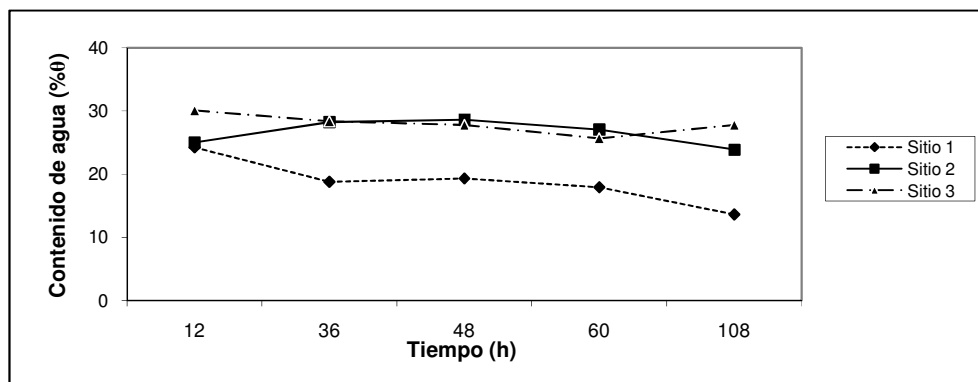


Figura 12b. Variación del contenido de humedad del suelo en la capa compactada(12-20 cm), después de saturación en función del tiempo.

Dados los resultados, la baja conductividad hidráulica de la capa de 12-20 cm estaría regulando el movimiento del agua hacia capas más profundas y mantendría estable los

niveles de humedad entre un 18% y 30% después de 108 horas. Por otra parte, la estabilidad de los niveles de humedad en la capa profunda alrededor del 30%, indicarían una mayor capacidad de almacenamiento de humedad, aunque se mantiene una baja conductividad hidráulica que reduce las pérdidas por percolación.

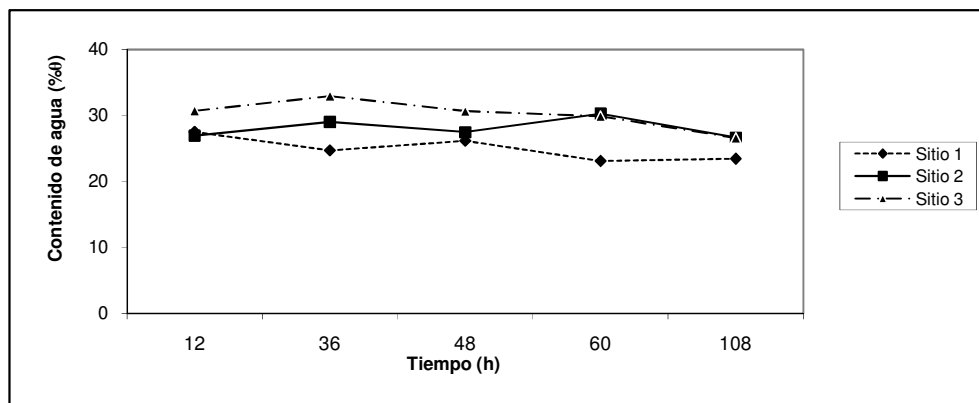


Figura 12c. Variación del contenido de humedad del suelo en la capa profunda(20-30 cm), después de saturación en función del tiempo.

Del análisis de los resultados de las variables físicas, se podría resumir, que el suelo bajo estudio, presenta una evidente compactación en la capa subsuperficial (12-20 cm), con una baja estabilidad estructural, favorecida por la alta proporción de partículas de limo y arenas fina y muy fina, baja macroporosidad y muy baja conductividad hidráulica, lo cual restringe tanto el almacenamiento y movimiento interno del agua, como el balance con la aireación, al presentar una baja porosidad con predominio de microporos. Además, tanto la alta cohesión en seco como la compactación evidenciada, pueden afectar severamente el desarrollo de raíces del cultivo según lo señalado por Gardner *et al.* (1999), el cual se comprometería por el limitado acceso al agua del suelo en esta zona y su limitada aireación.

3.2. Características generales de los genotipos estudiados

En la experimentación se estudiaron cuatro genotipos de maíz de importancia económica y con diferente tolerancia al estrés hídrico (Cuadro 5). Así, el genotipo C₁ es un híbrido comercial muy utilizado en la región, con características de tolerancia a la sequía, el cual según los productores, ha mostrado un comportamiento estable en siembras comerciales,

manteniendo rendimientos aceptables (4 - 5 Mg ha⁻¹) en épocas con problemas de lluvias erráticas, requiriendo niveles medios de tecnología, así como la adecuada suplencia de fertilizantes en la siembra y el reabono con úrea. El genotipo C₂, es una variedad tolerante a la sequía proveniente de líneas desarrolladas por el CIMMYT y ampliamente usado en ensayos, como genotipo de referencia durante los años de selección, ha mostrado estabilidad en los rendimientos bajo condiciones de limitada humedad con promedio de rendimiento de 2 Mg ha⁻¹, pudiendo alcanzar más de 4 Mg ha⁻¹, en condiciones de adecuada suplencia de agua. Según Bolaños y Edmeades (2003) este genotipo ha cambiado su estructura fenotípica a través de los años de selección, resaltando su bajo desarrollo radical, y baja altura, características que le han permitido adaptarse a gran cantidad de climas y condiciones de suelo.

Por otra parte, los genotipos C₃ y C₄ son híbridos con elevado potencial de rendimiento, los cuales experimentalmente deben superar genotipos testigos con rendimientos en ensayos regionales superiores a 6,5 Mg ha⁻¹ (García *et al.*, 2009). El rendimiento de híbridos bajo condiciones tropicales medido en siete ambientes, ha variado entre 7,1 y 7,9 Mg ha⁻¹ según (Pandey y Gardner; Vasal, Dhillon y Srinivasan, citados en Paliwal, 2001). Para expresar estos niveles de producción, estos genotipos requieren un alto nivel tecnológico, que implica la aplicación de fertilizantes y riego en alta cantidad y oportunamente, además de labores efectivas de control de plagas y enfermedades. En general, son genotipos con una altura de planta superior a 1,60 m, gran desarrollo radical y tallo grueso.

Cuadro 5. Descripción de los genotipos evaluados.

Genotipos de maíz	Nombre	Tipo de genotipo	Rendimiento potencial (Mg ha ⁻¹)
C ₁	TOCORON 550	HIBRIDO DOBLE DE GRANO BLANCO	6,5*
C ₂	TUXPEÑO SEQUIA C8	VARIEDAD DE GRANO BLANCO	3,7**
C ₃	DANAC 3273	HIBRIDO DE GRANO BLANCO	>8*
C ₄	DANAC 5008	HIBRIDO DOBLE DE GRANO BLANCO	>8*

* comunicación personal. **Bolaños y Edmeades (2003).

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Justificado, Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Tabla con formato

Con formato: Justificado, Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Justificado, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Justificado, Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Justificado, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Justificado, Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: Justificado, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: ... [1]

Con formato: ... [2]

Con formato: ... [3]

Con formato: Justificado, Espacio Antes: 6 pto

Con formato: ... [4]

Con formato: Fuente: 9 pto, Sin Negrita

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Fuente: 9 pto, Sin Negrita

3.3. Diseño del experimento y tratamientos

3.3.1. Diseño del experimento

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con arreglo de tratamientos en parcelas sub-sub-divididas, el cual tiene tres niveles de precisión: la parcela principal, el más bajo y la sub-sub-parcela el más alto nivel de precisión. Los tratamientos fueron: parcela principal (dos condiciones de suplencia de agua), sub-parcela (dos formas de preparación de suelo), y sub-sub-parcela (cuatro genotipos) y tres repeticiones ó bloques (2x2x4x3). La unidad experimental o parcela estuvo conformada por 9 hileras de cada genotipo, con 14 plantas cada una. Las variables del experimento fueron medidas en las cinco hileras centrales, dejando dos hileras de bordura y dos plantas en los bordes de línea, para evitar los efectos de interferencia entre parcelas (Figura 13). Las repeticiones se ubicaron orientadas en el sentido de la mayor pendiente (oeste-este) y el tratamiento de suelo compactado, se ubicó en el área central del terreno para facilidad de manejo de la maquinaria, y abarcando los dos tratamientos de riego (Figura 14).

El área total del experimento fue calculada en 2280 m², aproximadamente (30 m x 76 m), con un área por parcela experimental de 26,8 m². Asimismo, el área por planta dentro de la parcela experimental fue de 0,2125 m² (0,85m x 0,25m), para una densidad poblacional aproximada del cultivo de 47.000 plantas ha⁻¹.

3.3.2. Tratamientos de suplencia de agua

Se establecieron dos tratamientos de suplencia de agua, según los siguientes criterios:

- Necesidades hídricas:

Las necesidades hídricas para el cultivo en general, se calcularon con base en la evapotranspiración real del cultivo (ET_c) (Cuadro 6), según la fórmula general:

$$ET_c = ET_o * K_c$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

K_c = coeficiente del cultivo según su etapa de desarrollo

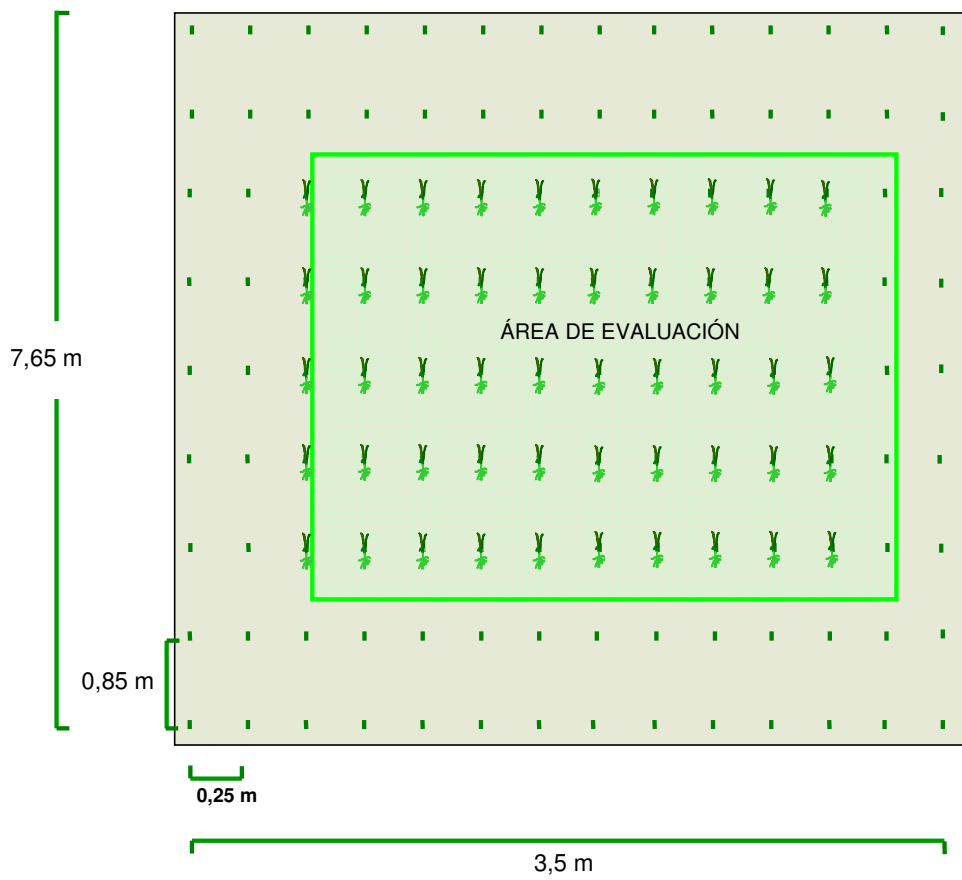


Figura 13. Representación de la unidad experimental, mostrando en el recuadro interno el área de evaluación.

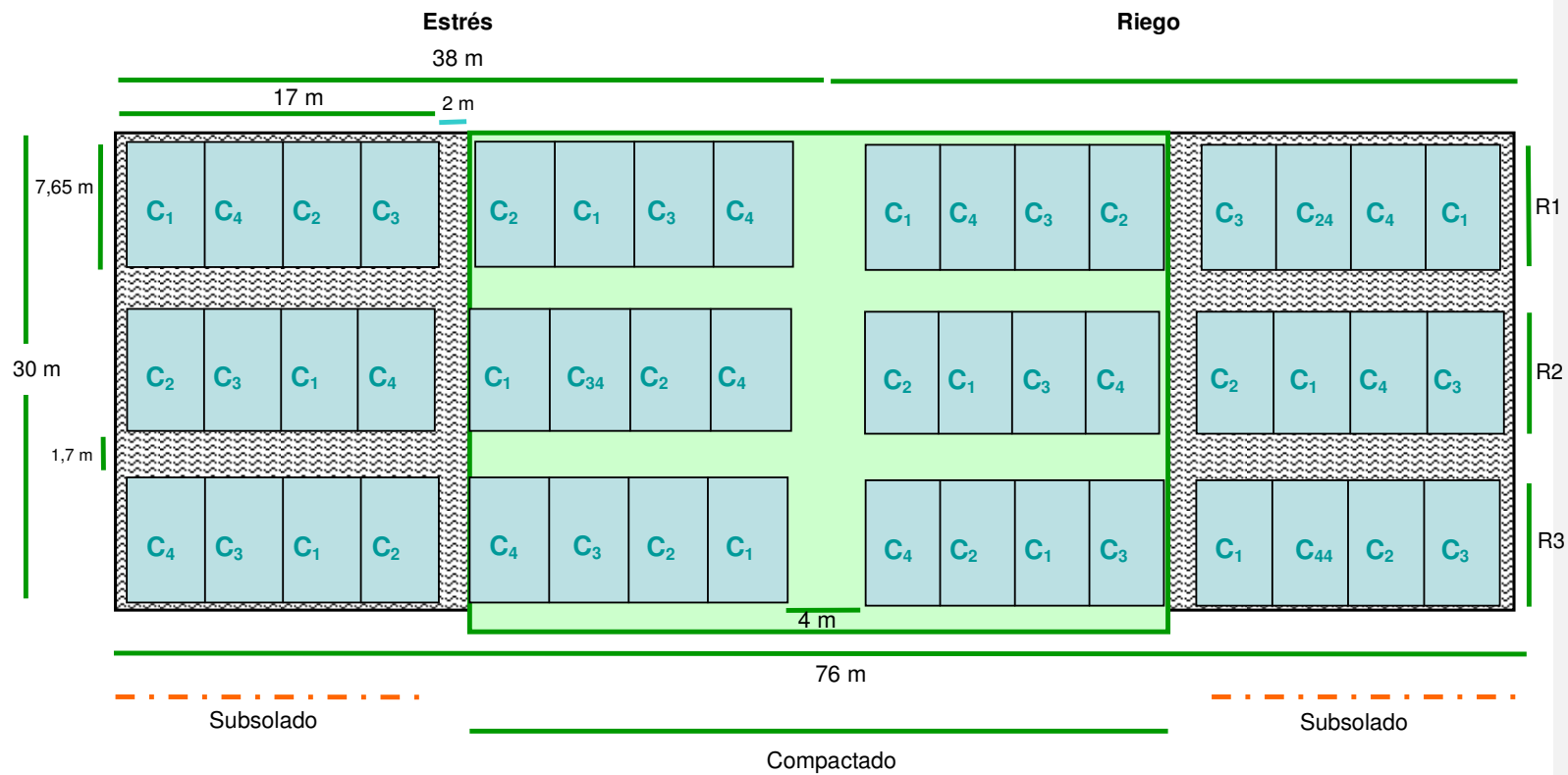


Figura 14. Distribución general de los tratamientos en el campo.

El coeficiente Kc, que expresa la capacidad del cultivo de extraer agua según su etapa de desarrollo, se consideró para maíz entre 0,3 y 1,20 según FAO (2013). Asimismo, se estimó la duración para cada etapa de desarrollo, tomando en consideración los estadíos del cultivo, en campo (Cuadro 6).

Cuadro 6. Evapotranspiración real del cultivo según la etapa de desarrollo.

Etapa	Mes	Duración (días)	ET _o (mm día ⁻¹)	Kc	ET _c	
					mm día ⁻¹	mm período ⁻¹
Vegetativo	Marzo	19	7,1	0,3	2,13	40,47
	Abril	16	6,5	0,3	1,95	31,2
Floración	Abril	14	6,5	0,8	5,2	72,8
	Mayo	21	5,6	0,8	4,48	94,08
Llenado de grano	Mayo	10	5,6	1,2	6,72	67,2
	Junio	15	4,3	1,2	5,16	77,4
Maduración	Junio	15	4,3	0,7	3,01	45,15
					Total:	428,3

- Necesidad de riego

Considerando los resultados obtenidos sobre las necesidades diarias del cultivo para cada etapa, se calculó el requerimiento de agua para el período de duración de cada una (Cuadro 7). Esto permitió calcular la necesidad de riego total de 433,5 mm para todo el ciclo, utilizando la relación:

$$\text{Necesidades de riego (Nn): } Nn = ETc - Pe$$

Donde:

Pe= precipitación efectiva que para la estimación de riego, se consideró cero

Tomando como base la estimación de los requerimientos hídricos totales (Cuadro 7), se calculó la lámina de riego a aplicar de forma de cubrir satisfactoriamente las necesidades del cultivo, asumiendo un aporte total a través del riego. La lámina efectiva se calculó según la siguiente relación:

$$\text{Lámina efectiva} = \text{Lámina bruta} * \text{eficiencia en el método de aplicación}$$

Se estimó una eficiencia de riego de 75 %, considerando el método por surcos y el equipo.

Cuadro 7. Necesidades estimadas de agua por parte del cultivo, según la etapa de desarrollo.

Etapa	Necesidades diarias (mm día ⁻¹)	Duración (días)	Necesidades por período (mm)	Aporte en tratamiento de estrés (mm)	Déficit (mm)
Vegetativo	2,00	35	70,00	70,00	0
Floración	4,80	35	168,00	96,00	72
Llenado de grano	6,00	25	150,00	150,00	0
Maduración	3,03	15	45,50	45,50	0
TOTAL:		110	433,50	361,50	

Las estimaciones realizadas y los resultados previos de infiltración, drenaje y la curva de retención de agua del suelo (Figuras 3,4 y 5), condujeron a plantear la aplicación de riego con una frecuencia de 7 días, durante cuatro horas, que fue el tiempo estimado hasta alcanzar un contenido de humedad a capacidad de campo en el área regada, observado en forma práctica, por el humedecimiento total en los camellones. Sin embargo, con el aumento del requerimiento diario del cultivo, esta frecuencia se redujo a cuatro (4) días entre los 35 y 48 días después de la siembra, aplicándose un máximo de 12 riegos, según cada tratamiento (Cuadro 8). Es de destacar, que la frecuencia de riego estuvo condicionada además, por la disponibilidad de los equipos y el apoyo de mano de obra.

Cuadro 8. Aporte hídrico estimado aplicado con el riego y aporte total al cultivo para los tratamientos de suplencia de agua.

Tratamiento	N° de riegos	Lámina bruta (mm)	Total (mm)	Lámina efectiva de riego (mm)
Riego	12	70	840	630
Estrés	9	70	630	472,5

1. Tratamiento de suplencia de agua N° 1 (Riego): consistió en la suplencia complementaria de agua, por medio de riego superficial en surcos, durante todo el periodo de crecimiento, para un total de 12 riegos. El agua fue suministrada por bombeo con tubería proveniente del Río Tiznados, cuya caracterización se presenta en el cuadro 9.
2. Tratamiento de suplencia de agua N° 2 (Estrés): al igual que el tratamiento 1, se realizó la suplencia complementaria de agua hasta los 30 días después de la siembra (dds), con suspensión del riego a esa fecha por un período de 20 días, estimándose que el estrés se inició cinco (5) días después del último riego (20% del agua disponible), lo que se ajusta al período vegetativo de dos semanas antes de floración, con lo cual se esperaba afectar la etapa de llenado de grano según el protocolo de Bolaños y Edmeades (1993a). Luego se reanudó el riego a los 51 días después de la siembra hasta el final del período vegetativo, aplicándose un total de 9 riegos.

Los resultados del análisis del agua de riego (Cuadro 9), indican una baja concentración de iones disueltos, siendo insignificante el riesgo de salinidad del suelo por esta vía. Esto, corrobora las observaciones planteadas en estudios previos conducidos en la zona por Strebin *et al.* (1967) y SOCODEC-Venezuela (2002), donde se resalta la marcada influencia de los materiales parentales, en las características del suelo observadas actualmente, con poca influencia de otras variables como el aporte por el agua de riego.

Cuadro 9. Caracterización química del agua de riego, proveniente del Río Tiznados

pH	C.E. (dS m ⁻¹)	Cationes (me L ⁻¹)				Aniones (me L ⁻¹)			
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	Cl ⁻
6,79	0,41	4,40	0,09	0,43	0,04	-	4,6	0,01	0,05

3.3.3. Tratamientos de preparación del suelo

Previo a la aplicación de los tratamientos de preparación, el suelo había sido rastreado con cuatro pases cruzados para la incorporación de los restos de la cosecha anterior.

1. Tratamiento N° 1 (Compactado): se preparó en forma tradicional a lo acostumbrado en la región, aplicando cuatro (4) pases de rastra en forma cruzada. Esta labor se efectuó a un contenido de humedad promedio de $0,07 \text{ g g}^{-1}$, con lo cual se garantizó una mejor eficiencia en el uso de la maquinaria, ya que a mayor humedad, el suelo tiende a adherirse al tractor y los implementos, dificultando la preparación.
2. Tratamiento N° 2 (Subsolado): fue preparado con dos (2) pases cruzados de rastra, seguido por dos (2) pases de subsolado en forma cruzada a una profundidad de 30 cm, aproximadamente, y dos pases de rastra cruzados al final, a un contenido de humedad promedio del $0,07 \text{ g g}^{-1}$. Con esta labor, se procuró solo fracturar la capa compactada, evitando el traslado de bloques de suelo hacia la superficie.

Ambos tratamientos fueron surcados para la aplicación de riego superficial.

3.3.4. Siembra de genotipos

Los genotipos fueron sembrados en forma manual el 13 de marzo de 2006, colocando tres semillas por punto en el tercio superior del camellón, para luego ralea hasta dejar una planta, estableciéndose una densidad de siembra de 4,7 plantas por m^2 equivalente a $47.000 \text{ pl ha}^{-1}$. Las evaluaciones se realizaron en las hileras centrales de la parcela (Figura 12).

Con formato: Sin Resaltar

3.3.5. Labores culturales

La semilla fue tratada con Vitavax 200 F ($2 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1}$ de semilla) para prevenir enfermedades por hongos. Las labores agronómicas, se realizaron según la etapa de cultivo, iniciándose la preparación de suelo el 1/03/2006 (Cuadro 10). El control de malezas se realizó aplicando Atrazina (1.5 L ha^{-1}) como pre-emergente al inicio del ensayo, y en forma manual dentro de la parcela durante la etapa de crecimiento del cultivo. En áreas laterales al ensayo se aplicó Gramoxone (1.5 L ha^{-1}) y Roundup spectra (1 L ha^{-1}) en forma dirigida. Asimismo, se hicieron controles de plagas en forma puntual, especialmente para el control de cogollero, cuando hubo brotes importantes, utilizando Dipterex 500 (1 L ha^{-1}).

3.4. Evaluaciones realizadas:

3.4.1. En el suelo:

- **Caracterización física de los suelos:**

La caracterización física del suelo se realizó previa a la instalación de los tratamientos, tomando submuestras cada 10 metros de acuerdo a un diseño de muestreo sistemático:

- Se separaron en el perfil tres capas de suelos en función de los resultados del análisis previo de la capa compactada (0 - 12, 12 - 20 y 20 – 30 cm).
 - Se realizaron observaciones y mediciones de humedad y resistencia a la penetración en cada capa de suelo.
 - Se tomaron muestras disturbadas y no disturbadas para evaluaciones complementarias en laboratorio.
- **Determinaciones en el campo:**
 - **Tasa de infiltración:** Se utilizó el método del doble anillo, según la metodología descrita por Pla (1983).
 - **Conductividad hidráulica saturada:** Se determinó en tres sitios del área experimental, usando los cilindros de infiltración, hasta alcanzar la infiltración básica, la cual se asumió como equivalente a la conductividad hidráulica saturada del suelo (Pla, 1983).
 - **Resistencia a la penetración:** se utilizó un penetrómetro de reloj (DICKEY-John) y uno de impacto diseñado por Nacci y Pla (1991). Las evaluaciones de resistencia se realizaron con el penetrómetro de impacto antes de la siembra, registrándose en todos los casos los valores de humedad. Por otra parte, el penetrómetro de reloj se utilizó de referencia, según lo descrito previamente en la identificación de las capas de suelo, y posteriormente para evaluar el efecto del subsolado en la capa compactada.
 - **Toma de muestra no alteradas:** utilizando un toma muestra tipo Uhland, con el propósito de tomar muestras cilíndricas, de 5 cm de diámetro y 5 cm de largo para determinaciones complementarias en el laboratorio.
 - **Toma de muestras disturbadas:** para análisis complementarios en el laboratorio.

- **Monitoreo de humedad:** utilizando el método gravimétrico, se monitoreó semanalmente el agua remanente en cada capa de suelo, por parcela experimental. Para ello, se utilizó un cilindro de 5 cm de diámetro y 40 cm de largo, extrayendo muestras simultáneas por cada capa de suelo, ubicando el sitio de muestreo a 10 cm del pie de la planta en la hilera de siembra. [El agua remanente es definida, como el contenido de agua retenido en el suelo al momento de la medición, a cualquier potencial.](#)

- **Determinaciones en el laboratorio:**

En las muestras disturbadas tomadas en cada una de las capas de suelo, se realizaron las siguientes determinaciones:

- **Distribución de tamaño de partículas:** por el método de Gee y Or (2002).
- **Índice de separabilidad de las partículas minerales (ISP):** se calculó según la siguiente relación y valorada según Florentino (1998).

$$ISP = \% \text{ arcilla } / (\% \text{ limo } + \% \text{ arena muy fina } + \% \text{ arena fina})$$

- **Distribución de agregados estables al agua:** solo en las muestras superficiales, por el método del tamizado en agua (Yoder modificado (1936), descrito en Pla, 1983)
- **Retención de agua:** para cada capa de suelo, se determinó a saturación, -10 kPa (en mesa de tensión), -33, -100, -1.000 y -1.500 kPa (utilizando platos y ollas de presión).

- **Determinaciones en muestras no alteradas**

En las muestras cilíndricas obtenidas con el tomamuestras tipo Uhland, siguiendo la metodología descrita en Pla (1983), se realizaron las siguientes determinaciones:

- **Densidad aparente**
- **Porosidad total y distribución de tamaños de poros** (utilizando la mesa de tensión).
- **Conductividad hidráulica saturada:** utilizando un permeámetro de carga constante (2,3 cm de carga).

- **Módulo de ruptura:** utilizando un aparato de compresión modelo U-160. Cenco Instruments Corp. U.S.A.

3.4.2. En la planta:

- **Rendimiento**

Se cosecharon manualmente 10 plantas de las cinco hileras centrales de la parcela experimental, determinando humedad del grano y se ajustó el peso para una humedad de 12%. Esto se realizó utilizando un equipo medidor de humedad marca DICKEY–John Corp., modelo 46233-1230 A.

- **Intervalo Antésis - Estigma (ASI)**

Una vez iniciada la floración (50 dds), la antésis se determinó por evaluación visual a través de un conteo diario, y se consideró su inicio, a la fecha en la cual en un 50% de la población de plantas dentro de la unidad experimental, había emergido la inflorescencia masculina. De igual forma, se realizó la determinación para la emergencia de la inflorescencia femenina, para considerar el inicio de la etapa de emisión de los estigmas (Silking por su nombre en inglés). El ASI se calculó, como la diferencia en días entre ambas fechas (Bolaños y Edmeades, 1996).

4. Índice de área foliar (IAF)

A tres plantas por repetición, identificadas dentro de cada unidad, se les midió manualmente el ancho y el largo de la hoja opuesta inferior al punto de inserción de la mazorca (Medina, 1993), calculando el área foliar como el producto del valor obtenido por un factor de 0.75 (Stewart y Dwyer, 1999). Por otra parte, con el número de hojas verdes de la planta (X_v) y el número total de hojas (X_{tot}), se estimó el área foliar verde de la planta (Y_{pv}) y el área foliar total de la planta (Y_p), utilizando el factor F propuesto por Elings, (2000), que relaciona estas variables. Finalmente se calculó el índice de área foliar total (IAF_t), y el índice de área foliar verde (IAF_v) como la relación:

$$IAF_t = Y_p(\text{cm}^2) / \text{área ocupada por la planta} (\text{cm}^2)$$

ó

$$IAF_v = Y_{pv}(\text{cm}^2) / \text{área ocupada por la planta} (\text{cm}^2)$$

5. Biomasa aérea

La biomasa representa la cantidad de materia seca acumulada por unidad de área.

$$Biomasa \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Peso seco de las plantas}}{\text{Área cosechada}}$$

Se realizó la evaluación de la biomasa acumulada durante del ciclo de cultivo, cosechando diez plantas por tratamiento a los 45 y 98 días después de la siembra, para lo cual se cortaron las plantas a ras del piso. Todas se secaron en estufa a 50 °C, hasta peso constante (72 horas) determinándose el peso seco (g). Para ello, las plantas jóvenes se picaron, separando las raíces, el tallo y las hojas, mientras que las adultas se fraccionó el tallo en varias partes.

6. Peso seco de raíces

Paralelo a la determinación de biomasa aérea, se determinó en las mismas plantas el peso seco de las raíces siguiendo el mismo procedimiento.

7. Partición de biomasa

Cinco plantas por tratamiento fueron cosechadas a los 98 días, determinándose el peso seco por separado del tallo, hojas, brácteas, grano y tusa. Posteriormente se calculó la biomasa de cada órgano.

8. Índice de Cosecha

Con los valores de biomasa total (B) y rendimiento en grano (R), se calculó el índice de cosecha (IC), como la relación:

$$IC = \frac{R}{B}$$

9. Características biométricas

Se midió la altura de 10 plantas por tratamiento a los 40 y 90 días después de la siembra, tomando la distancia desde la superficie del suelo, hasta el borde superior de la espiga y expresándola en centímetros. Asimismo, a los 90 días se evaluó la altura de la mazorca, desde la superficie del suelo, hasta el punto de inserción de la primera mazorca en la planta.

10. Concentración de nutrientes en las hojas

A los 75 días, después de alcanzar las plantas más del 80% de la floración femenina, se tomaron muestras en tres plantas por tratamiento de la hoja opuesta e inferior a la mazorca más alta, procediéndose al lavado con agua destilada y se colocó en estufa a 60° por 72 horas. Una vez secas, se procedió a molerlas para proceder con el análisis de tejido por el método de mineralización por vía húmeda (Cothenie *et al.*, 1982). Se determinó el contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) por el método colorimétrico (Page, 1982); calcio (Ca) y magnesio (Mg) por absorción atómica (Jackson, 1964); cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn) extraídos por Mehlich 1 y leído por absorción atómica (UCV, 1993).

3.5. Registro de variables climáticas y temperatura de la hoja

3.5.1. Variables climáticas

Se efectuó un registro de la precipitación diaria utilizando un pluviómetro colocado dentro del área del ensayo. Asimismo, se registró periódicamente la temperatura promedio del aire.

3.5.2. Temperatura de la hoja y humedad relativa en el cultivo

Durante el período de aplicación del estrés hídrico, con el uso de un termómetro infrarrojo, se midió la temperatura de la hoja en forma directa sobre la vaina foliar de los genotipos, según cada tratamiento en el horario de 11:30 am a 12 m. La humedad relativa del ambiente por tratamiento de genotipo, se calculó derivándola de la temperatura ambiental máxima y mínima del aire, registrada en el horario de 11:00 am a 12:00 m.

Movido (inserción) [4]

Con formato: Sin Resaltar

Con formato: Sin Resaltar

Con formato: Sin Resaltar

3.6. Balance hídrico.

El balance hídrico se realizó considerando una profundidad efectiva de 12 cm (0-12 cm), ya que la presencia de la capa compactada a esta profundidad afectaría tanto la suplencia de agua como el desarrollo de raíces para el cultivo (sin considerar las variaciones genotípicas). De igual forma, se consideró el rango de humedad disponible calculado para esta capa, aplicando la ecuación modificada propuesta por Grassi (1998):

$$dn = d_{n-1} + Pe + Ac + R - ETc - Pp$$

donde:

dn : Lámina de agua en el suelo el día n (mm).

d_{n-1} : Lámina de agua en el suelo el día n-1 (mm).
 Pe : Precipitación efectiva (mm).
 Ac : Ascenso capilar (mm). Se consideró cero
 R : Riego (mm).
 ETc : Evapotranspiración real del cultivo (mm día⁻¹) ($ETr = ET_o \times Kc \times Kh$).
 ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día⁻¹).
 Kc : Coeficiente de cultivo.
 Kh : Coeficiente de humedad del suelo.
 Pp : Percolación profunda (mm). Se consideró cero

La Pe , se calculó como el 80% de la precipitación medida (Rivetti, 2006; Tekwa y Bwade, 2011).

El coeficiente de humedad del suelo (Kh) se obtuvo mediante la relación dada por Jensen et al., citados en Rivetti (2006):

$$Kh = \frac{[\ln (Aw + 1)]}{[\ln (101)]}$$

Siendo:

Aw : el porcentaje de agua disponible (relación entre la lámina de aguaremanente (dr) en el suelo y la lámina total (dt) de agua disponible para la evapotranspiración (dr/dt) \times 100).

3.7. Factor de respuesta general del cultivo (Ky)

A los fines de asociar la respuesta del cultivo con el déficit hídrico y el rendimiento general promedio bajo estas condiciones, se calculó el factor de respuesta Ky . El efecto de la aportación deficitaria de agua se calculó considerando una profundidad efectiva del suelo de 12 cm, utilizando para ello una función de producción que relaciona la reducción relativa de la producción, con la reducción relativa de la evapotranspiración de la siguiente forma (Fuentes y García, 1999):

$$\frac{Ym - Ya}{Ym} = Ky \frac{ETm - ETa}{ETm} \quad (a)$$

ó

$$1 - \frac{Ya}{Ym} = Ky \left(1 - \frac{ETa}{ETm}\right) \quad (b)$$

Donde:

- ETm = Evapotranspiración máxima,
- ETa = Evapotranspiración en condiciones de déficit hídrico,
- Ym = Producción máxima correspondiente a ETm ,
- Ya = Producción obtenida con ETa ,
- Ky = Factor de respuesta del cultivo

3.8. Análisis estadístico de los resultados

Modelo lineal aditivo

El modelo lineal aditivo del diseño en parcelas sub-sub-divididas utilizado, es el siguiente:

$$Y_{ijkh} = \mu + \beta_i + \rho_j + (\rho\beta)_{ij} + \gamma_k + (\rho\gamma)_{ik} + (\beta\rho\gamma)_{ijk} + \delta_h + (\rho\delta)_{ih} + (\gamma\delta)_{kh} + (\rho\gamma\delta)_{ikh} + \epsilon_{ijkh}$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, r \\ j = 1, 2, 3, \dots, a \\ k = 1, 2, 3, \dots, b \\ h = 1, 2, 3, \dots, c \end{cases}$$

Donde el valor Y_{ijkh} tiene los efectos de:

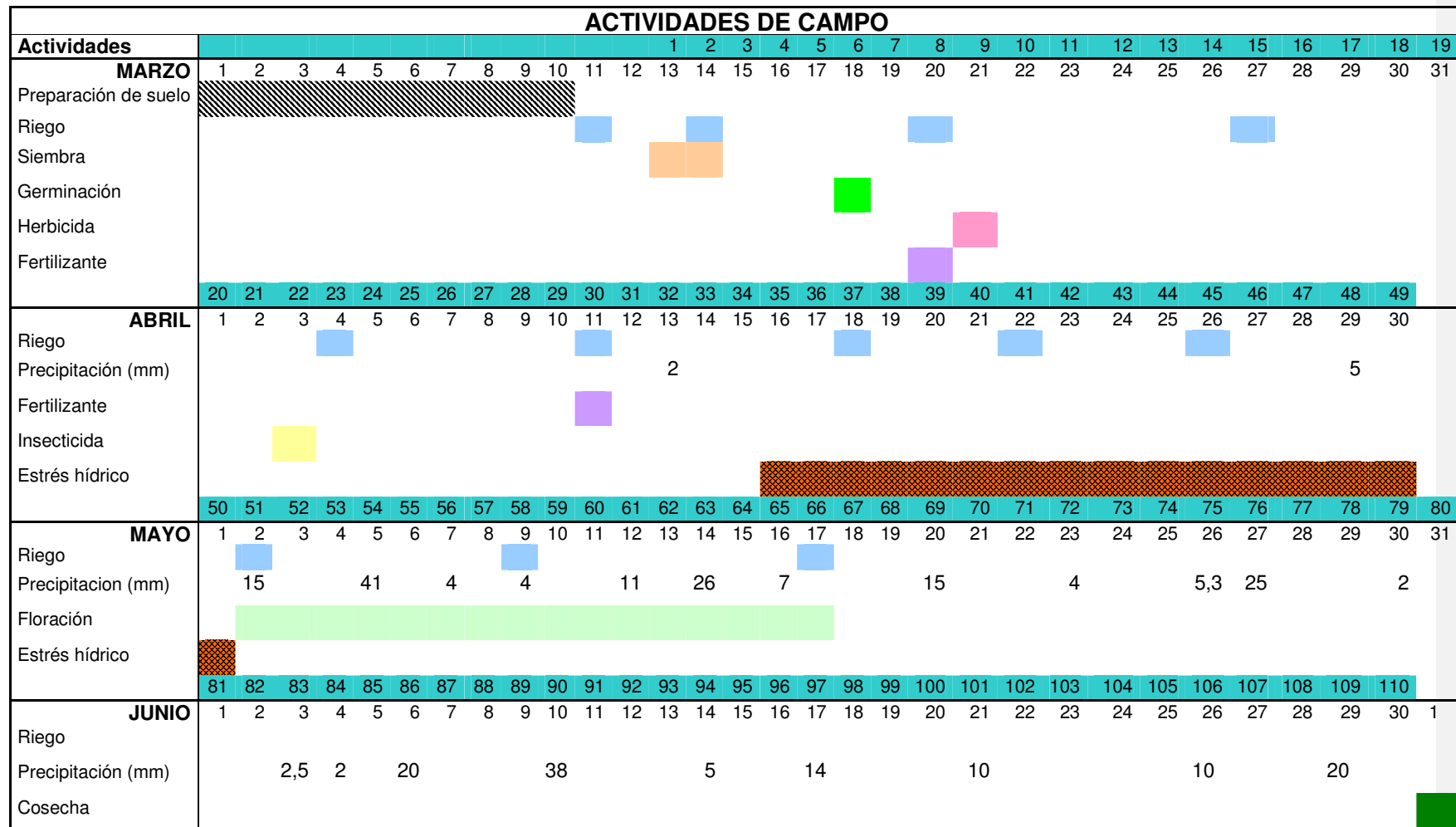
- μ = media general
- β_i = efecto de bloque
- ρ_j = efecto principal (Suministro de agua)
- $(\rho\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción Bloque x Suministro de agua (error de la parcela principal)
- γ_k = efecto secundario (Preparación de suelo)
- $(\rho\gamma)_{jk}$ = efecto de la interacción Suministro de agua x Preparación de suelo
- $(\beta\rho\gamma)_{ijk}$ = efecto de la interacción Bloque x Suministro de agua x Preparación de suelo (error de la sub-parcela)
- δ_h = efecto terciario (Genotipos)
- $(\rho\delta)_{jh}$ = efecto de la interacción Suministro de agua x Genotipos
- $(\gamma\delta)_{kh}$ = efecto de la interacción Preparación de suelo x Genotipos
- $(\rho\gamma\delta)_{jkh}$ = efecto de la interacción Suministro de agua x Preparación de suelo x Genotipos
- ϵ_{ijkh} = error experimental

A los fines de realizar los análisis estadísticos de los resultados se utilizó el programa Statistic 8, realizando las pruebas de normalidad, el análisis de varianza y las comparaciones de media correspondientes.

3.9. Cronograma de actividades de campo

En el cronograma de actividades desarrolladas durante la fase de campo (Cuadro 10), destaca que el ciclo de cultivo estuvo en 110 días.

Cuadro10. Cronograma de actividades de campo.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

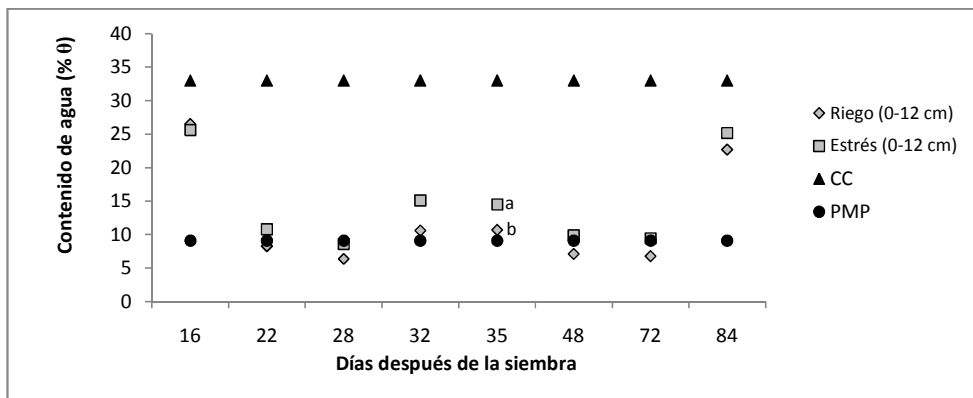
4.1. Variación del contenido de agua del suelo por capas según los tratamientos de suplencia de agua, preparación de suelo y genotipos

4.1.1. En los tratamientos de suplencia de agua

4.1.1.1. Durante el ciclo de cultivo

Al comparar el contenido de agua remanente en la capa superficial del suelo para los tratamientos de suplencia de agua, se puede observar que no hubo diferencias consistentes durante el ciclo de cultivo (Figura 15). El análisis de varianza (Anexos 8.1.a, b, c) indicó que solo los valores registrados a los 35 dds, mostraron diferencias significativas y donde el contenido de agua remanente del suelo en el tratamiento de riego, fue menor al tratamiento de estrés. No obstante, esta tendencia se mantuvo el resto del período de crecimiento del cultivo, lo cual podría ser importante si se considera que los valores registrados fueron cercanos al punto de marchitez permanente, incluso inferiores según la curva característica de retención de humedad del suelo (Figura 4).

Con formato: Espacio Después: 18 pto

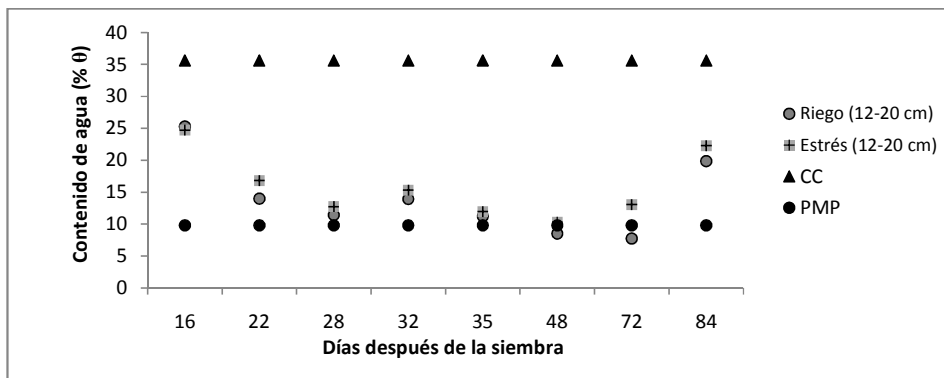


CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente.

Figura 15. Valores promedio del contenido de agua del suelo ($v v^{-1}$) para la capa superficial, durante el ciclo de cultivo en los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas el mismo día de evaluación, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Algunos autores(Hareet *al.*, 1999; Blum, 2004), han subrayado la importancia de pequeños cambios en el agua del suelo por los efectos que pueden inducir a nivel fisiológico en las plantas, especialmente a nivel hormonal.

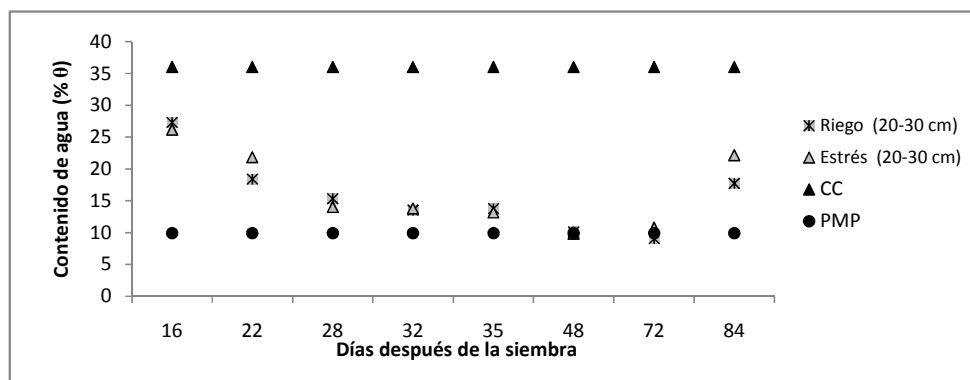
Este comportamiento no fue tan marcado en la capa compactada (12-20), donde las diferencias fueron mínimas y no significativas (Anexos 8.1. d, e, f), aunque la tendencia a existir mayor contenido de agua en el tratamiento de estrés se mantuvo (Figura 16). Además, solo en las evaluaciones a los 48 y 72 dds, se registraron valores de humedad por debajo del punto de marchitez permanente.



CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente.

Figura 16. Valores promedio del contenido de agua (v_v^{-1}), en la capa compactada durante el ciclo de cultivo, para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

La comparación de medias del agua remanente en el suelo en la capa más profunda (20-30 cm), evidenció un comportamiento muy similar para ambos tratamientos durante todo el ciclo de cultivo (Figura 17). Esta similitud sugiere que el agua remanente en esta capa, no fue afectada por el tratamiento de suplencia de agua, al igual que la capa compactada (Anexos 8.1 g, h, i). Por otra parte, solo a los 72 dds, el agua del suelo en el tratamiento bajo riego estuvo ligeramente por debajo del punto de marchitez permanente.



CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente.

Figura 17. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) en la capa profunda, durante el ciclo de cultivo, para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

4.1.1.2. Durante el período de aplicación del estrés

a) Capa superficial (0-12 cm)

La comparación de medias para el tratamiento de suplencia de agua, solo fue significativamente diferente a los 35 dds, en la capa superficial del suelo, mostrando valores más altos bajo el tratamiento de estrés (Cuadro 11). El tratamiento de riego alcanzó valores relativamente uniformes durante este período, donde a los 48 días incluso registró valores por debajo del punto de marchitez permanente. Al respecto, Tolk y Evett (2012) encontraron que en un suelo franco arcilloso, el límite más bajo de uso del agua por el maíz, estuvo por debajo del punto de marchitez medido en laboratorio, por lo que su registro no parece tan extraño.

Cuadro 11. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) para los tratamientos de suplencia de agua por capas de suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico.

Suplencia de agua	Capa 0-12			Capa 12-20			Capa 20-30		
	DDS			DDS			DDS		
	32	35	48	32	35	48	32	35	48
Riego	10,08a	10,63a	6,7a	13,54a	10,71a	8,08a	13,29a	12,87a	9,29a
Estrés	14,63a	13,96b	9,5a	14,79a	11,46a	9,79a	16,25a	13,29a	9,67a

DDS= Días después de la siembra. Letras distintas en la columna, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

b) Capa compactada (12-20 cm)

En esta capa, destacó el registro de contenidos mayores de agua remanente en el suelo en el tratamiento de riego en comparación a la capa superficial, mostrando diferencias no significativas con el tratamiento de estrés. Resalta de igual forma, un mayor contenido de agua al final del período en el tratamiento de riego, aunque no comparable al observado en la capa superficial.

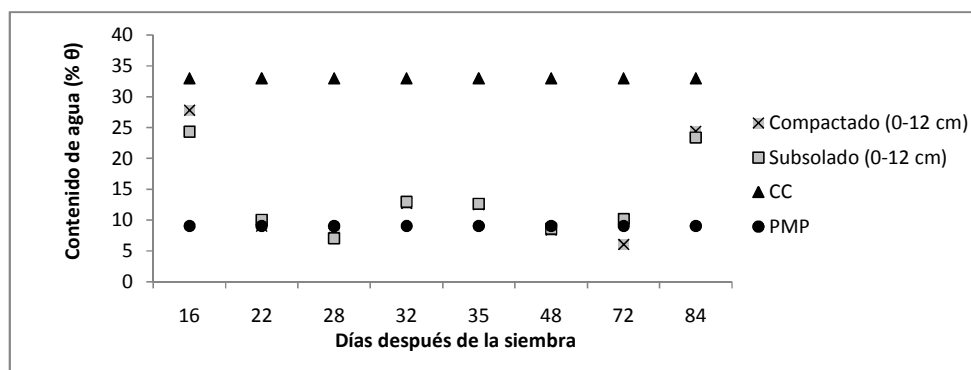
c) Capa profunda (20-30 cm)

El contenido de agua en esta capa, indicó un comportamiento similar al registrado en la capa compactada para ambos tratamientos, aunque con valores más altos en el tratamiento de estrés en las primeras fechas.

4.1.2. En los tratamientos de preparación de suelo

4.1.2.1. Durante el ciclo de cultivo

El análisis de varianza de la evaluación del comportamiento de la humedad del suelo en la capa superficial, no evidenció diferencias estadísticas para los tratamientos de preparación de suelo durante el ciclo de cultivo (Figura 18), especialmente durante la aplicación del estrés de humedad (Anexo 8.1 a, b, c).



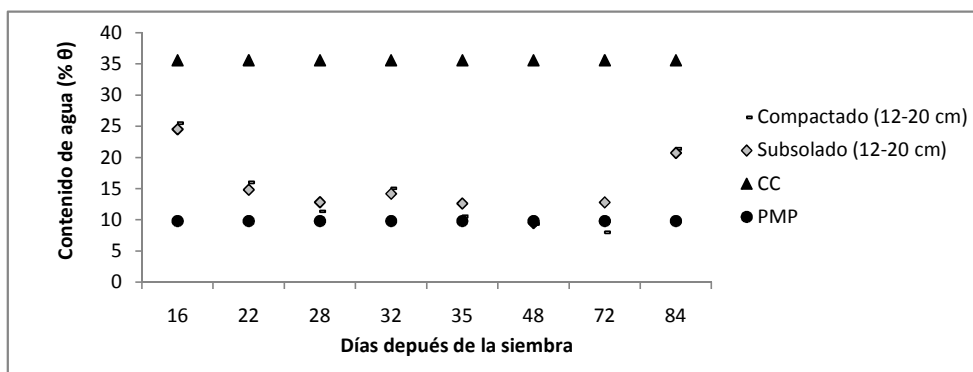
CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente.

Figura 18. Valores promedio del contenido de agua (v^{-1}), en la capa superficial para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Conviene destacar que durante los tres primeros muestreos, las plantas comenzaban su crecimiento, por lo que la capa superficial pudo ofrecer suficiente agua disponible para el cultivo durante esas primeras etapas, considerando que el desarrollo de raíces era incipiente. Por otra parte, el tratamiento del subsolado, además de fracturar en cierto grado la capa compactada, pudo favorecer la aireación de la capa superficial, por el tipo de implemento usado, ya que produce una perturbación del suelo circundante a la cuchilla. Este efecto, tendría relación con el desplazamiento del suelo lateralmente, favoreciendo la macroporosidad en el suelo (Spoor, 2006).

Eliminado: área circundante

Al comparar los resultados de agua del suelo en la capa compactada para los tratamientos de preparación de suelo (Figura 19), no se observan diferencias importantes en ambos tratamientos, con lo cual se puede indicar que el efecto del subsolado no se manifestó en cambios relevantes en la variable humedad del suelo.



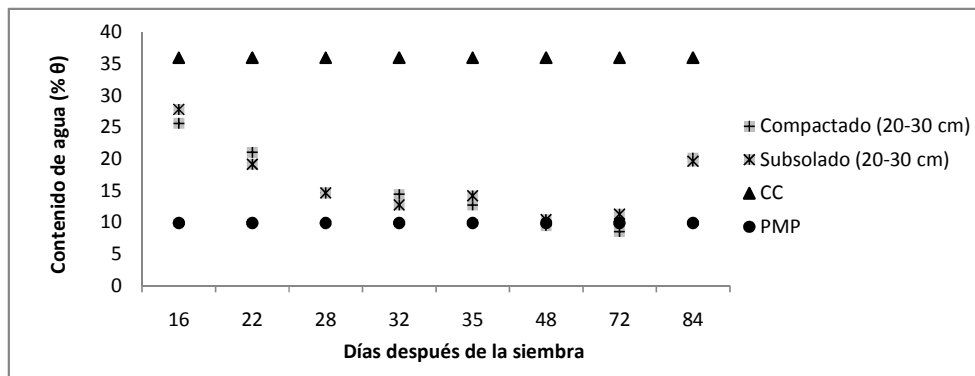
CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente.

Figura 19. Valores promedio del contenido volumétrico de agua, en la capa compactada para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

En la capa profunda (20-30), las diferencias entre las medias de agua por fechas, fueron mas pequeñas a los de la capa compactada (Figura 20), no indicando diferencias durante el ciclo de cultivo. Estos resultados confirman que el tratamiento de subsolado no afectó el comportamiento hídrico de esta capa de suelo, lo que coincide con algunos autores que limitan el efecto inicial del subsolado a las capas mas superficiales (Batey y McKenzie, 2006; Hamza y Anderson, 2005) y donde un efecto de largo plazo y mayor profundidad requiere de

Eliminado: interna

otras prácticas agrícolas como el uso de cultivos de cobertura y su incorporación, además de otros restos orgánicos (Abdollahi y Munkholm, 2014).



CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente.

Figura 20. Valores promedio del contenido volumétrico de agua, en la capa profunda para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Es evidente una mayor dinámica en la capa superficial, con tendencia a diferenciarse a lo observado en las capas más profundas, donde se evidenciaron valores similares y poco variables durante las evaluaciones. Esto podría relacionarse con las diferencias físicas observadas (Cuadros 3 y 4), destacando la alta compactación, menor porosidad, muy baja conductividad hidráulica y mayor cantidad de arcilla con relación a la capa superficial (0-12), lo que aumentaría la capacidad de retención del agua por el suelo y reduciría ampliamente su movilidad (Pla, 1983; Hamza y Anderson, 2005). De acuerdo con Alletto *et al.* (2006), el agua inmóvil se espera que sea mayor en horizontes arcillosos, aunque puede ser altamente dependiente del tipo de estructura de suelo.

Además, el contraste de capas en sí, genera diferencias en la continuidad de los poros, y podría reducir la homogeneidad de la estructura, lo que desfavorece la movilidad del agua (Pagliaiet *al.*, 2004). Asimismo, estudios realizados por Schmalz *et al.* (2003), han indicado que la presencia de capas diferenciadas en el suelo, además de causar discontinuidad en el contenido de humedad, favorece el flujo lateral hacia los bordes de las mismas, especialmente cerca de áreas secas.

Eliminado: muy parecidos entre sí

Eliminado: , que con la capa superficial

Eliminado: como la

Eliminado: menor capacidad de almacenamiento de agua del suelo en las capas profundas, dada

Eliminado: baja

Eliminado: además

La dinámica de la humedad registrada en la capa superficial debe estar estrechamente relacionada con los cambios por efecto del desarrollo del cultivo y de la evapotranspiración; no obstante, la actividad biológica pudo tener efectos significativos en esta capa al afectar factores físicos como la agregación de suelo y el movimiento del agua (Bengough y Mullins, 1990; Gardner *et al.*, 1999; Algayer *et al.*, 2014).

Eliminado: Cabe destacar, que l

Eliminado: ha sido muy

Eliminado: ,

Eliminado: donde

4.1.2.2. Durante el período de aplicación del estrés

a) Capa superficial (0-12 cm)

Con formato: Fuente:

Con formato: Fuente: 11 pto

La comparación de medias en los tratamientos de preparación de suelo durante el período de aplicación del estrés hídrico, no resultaron en diferencias estadísticas para la capa superficial (Cuadro 12). Los valores para ambos tratamientos, fueron muy similares en las fechas de evaluación con una reducción hacia el final del período, donde el nivel de humedad alcanzado estaba en el mínimo registrado para el suelo y el límite del punto de marchitez permanente según la curva de retención de agua del suelo (Figura 4).

Cuadro 12. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) para los tratamientos de preparación de suelo por capas de suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico.

Preparación de suelo	Capa 0-12			Capa 12-20			Capa 20-30		
	DDS			DDS			DDS		
	32	35	48	32	35	48	32	35	48
Compactado	12,42a	12,63a	7,92 ^a	13,75a	12,13a	9,00a	15,38A	13,75a	10,00a
Subsolado	12,29a	11,96a	8,29 ^a	14,58a	10,04a	8,08a	14,17B	12,42a	8,96a

DDS= Días después de la siembra. Letras distintas en la columna, mayúsculas muestran altamente significativas ($\alpha=1\%$) y minúsculas diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

b) Capa compactada (12-20 cm)

Con formato: Fuente:

Con formato: Fuente: 11 pto

En esta capa, tampoco se evidenciaron diferencias estadísticas entre las medias, con valores uniformes para las tres fechas evaluadas. Aunque se esperaría un efecto directo del subsolado sobre la variable humedad en esta capa, algunos autores como Logsdon *et al.*, (1990), encontraron que en localidades donde se aplicaron prácticas de preparación con arado, se produjo un rompimiento en la continuidad de los poros de la capa superficial, reduciendo la conductividad hidráulica. Esta discontinuidad en el suelo, puede producirse por el subsolado, lo que generaría un bajo aporte de agua del suelo presente en la capa

compactada hacia el cultivo, a pesar de la alta demanda hídrica bajo condiciones de estrés (Batey y McKenzie, 2006).

c) Capa profunda (20-30 cm)

La comparación de medias del contenido de agua en esta capa indicaron diferencias altamente significativas para la fecha de 32 dds, cuando se inicia el período de estrés, tanto para los tratamientos de suplencia de agua como de preparación de suelo. Estas diferencias entre los tratamientos pudieron observarse por la baja variabilidad de los valores observados en esta capa, con un coeficiente de variación cercano al 6% (Anexo 8.1 g). No obstante, esta diferencia no se mantuvo en el tiempo, desapareciendo a medida que aumentó el período de estrés hídrico.

Con formato: Fuente:

Con formato: Fuente: 11 pto

Eliminado: con la interacción de tratamientos (Anexo 8.1 g), resultando en

4.1.3. En los tratamientos de genotipos

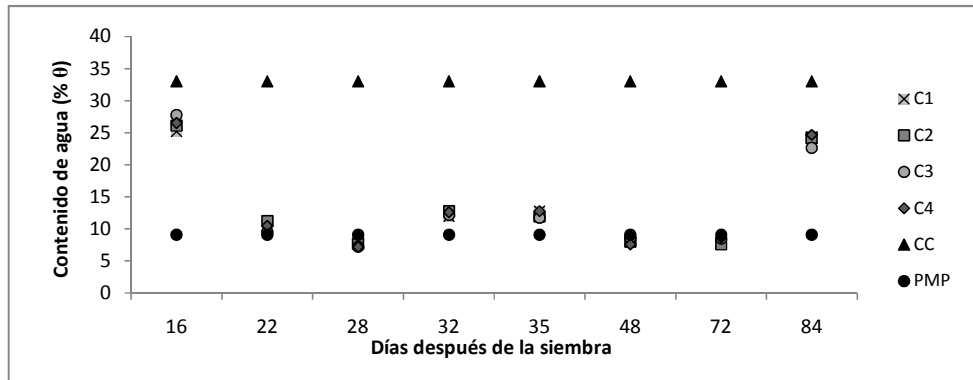
4.1.3.1. Durante el ciclo de cultivo

Los tratamientos de genotipos no indicaron diferencias durante el ciclo de cultivo, para la variable contenido de agua del suelo (Figura 21). Los valores promedios para cada genotipo fueron muy similares en cada evaluación en la capa superficial, especialmente durante el período de aplicación de estrés hídrico (Anexo 8.1 a, b, c). Este comportamiento indica que los genotipos en promedio consumieron cantidades similares de agua durante el ciclo de cultivo, con diferencias estadísticamente no significativas.

4.1.3.2. Durante el período de aplicación del estrés

a) Capa superficial (0-12 cm)

Durante el período de aplicación del estrés hídrico, el análisis de varianza para el tratamiento de genotipos no indicó diferencias estadísticas significativas sobre la variable humedad del suelo en la capa superficial (Anexo 8.1 a, b, c). La comparación de medias (Cuadro 13), muestra valores muy similares entre los genotipos para cada evaluación, sugiriendo alta homogeneidad entre los resultados.



CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente.

Figura 21. Valores promedio del contenido de agua, en la capa 0-12 cm para los tratamientos de genotipos. Letras distintas, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Aunque era de esperarse diferencias derivadas de [las diferencias genéticas](#), los resultados podrían justificarse por la complejidad de los factores que determinan el contenido de agua en el suelo en determinados momentos, especialmente con genotipos muy diferentes en su estructura fenotípica y los requerimientos hídricos. Así, aunque existen diferencias reportadas en cuanto a la eficiencia del uso del agua en genotipos como C₂ con un limitado desarrollo del sistema radical, esto no se manifestó en la variable medida (Bolaños *et al.*, 1993).

Eliminado: esta variable

Cuadro 13. Valores promedio del contenido de agua (vv^{-1}) por capas de suelo en los tratamientos de genotipos, durante el período de aplicación del estrés hídrico.

Genotipos	Capa 0-12			Capa 12-20			Capa 20-30		
	DDS			DDS			DDS		
	32	35	48	32	35	48	32	35	48
C ₁	11,92a	12,75a	8,25a	14,33a	11,08a	8,67a	14,00a	13,33a	9,67a
C ₂	12,75a	11,92a	8,00a	15,08a	11,75a	9,67a	16,83a	14,33a	10,75a
C ₃	12,17a	11,75a	8,58a	13,17a	10,75a	8,75a	14,25a	11,67a	8,67a
C ₄	12,58a	12,75a	7,58a	14,08a	10,75a	8,67a	14,00a	13,00a	8,83a

DDS= Días después de la siembra. Letras distintas en la columna, muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Con formato: Espacio Después: 6 pto, Agregar espacio entre párrafos del mismo estilo

Eliminado: para los tratamientos de genotipos

Eliminado: 25^a

Eliminado: 58^a

Eliminado: 58^a

b) Capa compactada (12-20 cm)

Al igual que la capa superficial, en la capa compactada no hubo diferencias significativas para la variable humedad del suelo entre los tratamientos de genotipos (Cuadro 14). Además, aunque los promedios a los 32 dds fueron ligeramente superiores a los de la capa superficial, a los 35 y 48 dds, los valores de humedad fueron similares. Los valores más bajos de la capa superficial estarían relacionados con la mayor actividad exploratoria del sistema radical de los genotipos (Ritchie *et al.*, 1992).

c) Capa profunda (20-30 cm)

El comportamiento de los genotipos en esta capa profunda se observó similar al medido en la capa compactada (Cuadro 14), incluyendo los mayores valores de humedad a los 32 dds.

Eliminado: ¶

4.1.4. Interacción de los tratamientos de suplencia de agua con los tratamientos de preparación de suelo

El análisis de varianza, indicó que la interacción de los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo, mostró diferencias significativas en algunas capas de suelo (Anexos 8.1 a, b, d, g). La comparación de medias del contenido de agua por capa y fecha de evaluación (Cuadro 14), indicaron que en la capa superficial hubo diferencias altamente significativas a los 32 dds y significativas a los 35 dds, en cuyas evaluaciones la interacción riego-subsolado alcanzó los valores más bajos, incluso por debajo del punto de marchitez permanente según la curva de retención de agua del suelo (Figura 4).

Cuadro 14. Valores promedio del contenido de agua (vv⁻¹) por capas de suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico, para la interacción de los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo.

Interacción		Capa 0-12			Capa 12-20			Capa 20-30		
		DDS			DDS			DDS		
		32	35	48	32	35	48	32	35	48
Riego	Compactado	12,80B	12,42b	5,58a	15,08ab	12,33a	8,75a	16,58ab	15,08a	11,25a
	Subsolado	8,08C	8,83c	7,83a	12,00b	9,08a	7,42a	10,00c	11,50a	8,08a
Estrés	Compactado	12,75B	12,83b	10,25a	12,42b	11,92a	9,25a	14,17b	12,42a	8,75a
	Subsolado	16,50A	15,08a	8,75a	17,17a	11,00a	10,33a	18,33a	13,33a	9,83a

DDS= Días después de la siembra. Letras distintas en la columna, mayúsculas muestran altamente significativas ($\alpha=1\%$) y minúsculas diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Esto podría significar que el subsolado en esta capa de suelo, mejoró la capacidad de almacenamiento del agua, favoreciendo además, su disponibilidad y absorción, aunque se

esperaría un efecto limitado dada la naturaleza del implemento, el cual se orienta a modificar efectivamente la capa compactada. En todo caso, pudo existir un efecto de mejoramiento en la aireación del suelo que afectara favorablemente la eficiencia de la absorción de agua por las raíces, aunque no fue evaluada alguna característica relacionada con esta variable.

La comparación de medias en la capa compactada (12-20) solo mostró diferencias significativas a los 32 dds, destacando el valor más alto de humedad en la interacción estrés-subsolado. El resto de las medias comparadas no fue significativo para las fechas siguientes, aunque el valor más bajo se registró en la interacción riego-subsolado, reiterándose lo observado en la capa superficial. Este comportamiento fue similar en la capa profunda (20-30), deduciéndose un efecto casi nulo en ambas capas, de los tratamientos analizados.

Estudios en maíz bajo riego han mostrado una mayor intensidad de extracción de agua por las raíces bajo condiciones de suplencia continua de agua, especialmente en los primeros 40 cm de profundidad del suelo (Coelho y Or, 1996). Además, el rápido crecimiento de las raíces y la mayor exploración del suelo, conllevaría a un rápido y un mayor consumo del agua del suelo por el cultivo (Amato y Ritchie, 2002). Sin embargo, los resultados observados en el ensayo indicaron ligeros cambios en la capa superficial al inicio del período de estrés hídrico, aunque no se mantuvo en el tiempo.

4.1.5. Interacción de los tratamientos de preparación de suelo con los tratamientos de genotipos

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas para la interacción de los tratamientos preparación de suelo-genotipos (Anexo 8.1 c, e, h), según las fechas de evaluación y las capas de suelo. La comparación de medias para esta interacción (Cuadro 15), revela que en la capa superficial, hubo diferencias altamente significativas a los 48 dds, donde el genotipo C₂ agotó más agua del suelo bajo el tratamiento compactado. Por su parte, el genotipo C₄ fue más efectivo en la extracción de agua del suelo bajo el tratamiento subsolado, cuando los valores de humedad fueron más bajos. Estas diferencias no se mostraron en la capa compactada para esa fecha, alcanzando valores similares para las interacciones.

Aunqueno se observaron diferencias, en la interacción de los tratamientos preparación de suelo-genotipos al inicio del período de estrés en la capa superficial (32 dds y 35 dds), tanto el limitado desarrollo radical de los genotipos para estas fechas, como las diferencias fenotípicas, pudieron reducir la expresión en el contenido de humedad remanente del suelo. En esta etapa, la demanda hídrica de los genotipos sería baja, con un sistema radicular poco denso, por lo que se esperaría, que las condiciones físicas de las capas superficiales del suelo afectaran poco el desarrollo inicial de los genotipos hasta después de la antésis, alrededor de los 50 días después de la siembra (FAO, 2013).

Cuadro 15. Valores promedio del contenido de agua (vv⁻¹) para la interacción de los tratamientos de preparación de suelo-genotipos por capas de suelo, durante el período de aplicación del estrés hídrico.

Interacción		Capa 0-12			Capa 12-20			Capa 20-30		
		DDS			DDS			DDS		
		32	35	48	32	35	48	32	35	48
Compactado	C ₁	11,17a	12,00a	8,17A	12,67a	12,83a	8,33a	14,50a	13,83a	10,00ab
	C ₂	13,17a	12,50a	6,83B	14,33a	10,83ab	8,33a	16,67a	15,17a	9,17b
	C ₃	13,00a	11,83a	9,67A	13,33a	12,17a	10,00a	14,00a	12,00a	9,67b
	C ₄	12,33a	14,17a	8,50A	14,67a	12,67a	9,33a	16,33a	14,00a	11,17a
Subsolado	C ₁	12,67a	13,50a	8,33A	16,00a	9,33b	9,00a	13,50a	12,83a	9,33b
	C ₂	12,33a	11,33a	9,17A	15,83a	12,67a	11,00a	17,00a	13,50a	12,33a
	C ₃	11,33a	11,67a	7,50AB	13,00a	9,33b	7,50a	14,50a	11,33a	7,67c
	C ₄	12,83a	11,33a	6,67B	13,50a	8,83b	8,00a	11,67a	12,00a	6,50c

DDS= Días después de la siembra. Letras distintas en la columna, en mayúsculas muestran diferencias altamente significativas ($\alpha=1\%$) y minúsculas diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Por otra parte, a los 48 dds., el comportamiento contrapuesto registrado por los genotipos C₃ y C₄ en relación con C₂, podría estar asociado con una mayor biomasa radical favorecida por el subsolado en los genotipos C₃ y C₄. Este desarrollo está reportado que se maximiza antes de la antésis (Amos y Walters, 2006), aunque dependerá también de otras características, como la arquitectura de la planta (Lynch, 1995), y cambios morfológicos ante las características del suelo, como la compactación (Materchera, *et al.*, 1992). Sin embargo, es evidente que el genotipo C₂, dada su estructura morfológica, pudo mostrar mayor eficiencia en el uso del agua disponible del suelo en el tratamiento de compactación (Bolaños *et al.*, 1993), en contraste a lo ocurrido en genotipos como C₄. Este comportamiento contrapuesto, podría ser una de las razones por las cuales no se evidenciaron diferencias en el tratamiento de preparación del

Tabla con formato

Eliminado: 17ª

Eliminado: 67ª

Eliminado: 50ª

Eliminado: 33ª

Eliminado: 17ª

Eliminado: igual

Eliminado: en condiciones

Eliminado: los tratamientos de preparación de suelo

Eliminado: con los demás

Con formato: Fuente: 11 pto, Subíndice

Eliminado: (Bolaños *et al.*, 1993)

suelo y sugiere que dicho genotipo es poco afectado por las condiciones de compactación del suelo.

El comportamiento de los genotipos C₃ y C₄, en la capa de 12-20 cm, corroboró una baja sensibilidad a los cambios físicos generados con el subsolado, ya que los genotipos no se diferenciaron estadísticamente con la variable medida. Es de resaltar, que además de favorecer la exploración radical y con ello la extracción del agua en el suelo (Amato y Ritchie, 2002), el subsolado debería mejorar la movilidad del agua y la aireación del suelo (Dexter, 2004), lo cual no parece haber sido logrado.

Eliminado: el contenido de agua no se diferenció estadísticamente de los demás

Eliminado: genotipos

Eliminado: se favorecen otras características como

Por otra parte, el genotipo C₁ no presentó diferencias con la aplicación de los tratamientos de preparación de suelo, lo que indicaría una baja respuesta a las condiciones físicas del suelo, especialmente en cuanto a compactación y baja porosidad. Al respecto, algunos autores como Materechera *et al.* (1992), han señalado cambios en el diámetro y la distribución radical de especies plantadas en suelos con capas compactadas, mientras que Amos y Walters (2006) indican que en maíz, el estrés en general puede inducir plasticidad y mayor profundidad de exploración en las raíces de algunos genotipos.

Eliminado: parece

Eliminado: r

Los resultados analizados, evidencian una diferencia sustancial de los genotipos, tanto en la capacidad de adaptación a las condiciones de humedad del suelo, como a los efectos de la compactación en su desarrollo. Entre las diferencias genotípicas, tanto la tolerancia al estrés de los genotipos C₁ y C₂, como la baja sensibilidad a condiciones de compactación y baja porosidad como ha sido señalado por Bänzinger *et al.* (2000), y Bolaños *et al.* (1993), podrían explicar su baja respuesta a los tratamientos de preparación de suelo.

Adicionalmente, genotipos de alto requerimiento tecnológico como C₃ y C₄, mostraron mayor sensibilidad a los tratamientos como el efecto del subsolador, lo cual pudo ser reflejo de un mejor desarrollo radicular o una mayor eficiencia en sus funciones. Este mejor desarrollo radicular de los genotipos en el tratamiento con riego, pudo haber marcado una mayor diferencia en el agotamiento de la humedad del suelo, y donde el subsolado pudo mejorar las condiciones físicas para el desarrollo radicular y así favorecer un mayor almacenamiento de agua del suelo y mejorar la aireación de las raíces (Gardner *et al.*, 1999; Bronick y Lal, 2005).

En este sentido, Amato y Ritchie (2002), trabajando con varios genotipos de maíz en un suelo franco arcilloso, encontraron una alta sensibilidad de los mismos a la baja porosidad del suelo, lo que afectó la exploración radical, asociada más a respuestas fisiológicas ante condiciones de suelo como la capacidad de aireación, que por efecto de la humedad. Entre los efectos negativos de la compactación, se restringiría el crecimiento de las raíces y se reduciría la accesibilidad para la exploración del suelo, tanto por el efecto físico de barrera, como por el intercambio gaseoso (Boyer y Silk, 2004).

4.2. Efecto del subsolado en la resistencia mecánica del suelo

Al comparar la resistencia a la penetración del suelo a los 15 cm de profundidad en el área experimental antes y después de aplicar el subsolado (Cuadro 16), puede indicarse, que entre los cambios ocurridos destaca la mayor homogeneidad de los valores (menor desviación estándar) presentando medias similares, con un valor de resistencia entre 1,87 y 1,82 MPa, antes y después del subsolado, respectivamente. Estos resultados, indican una mayor uniformidad en la distribución de la capa compactada en el perfil del suelo, reflejando por el menor coeficiente de variación observado.

Con formato: Espacio Después: 18 pto

Cuadro 16. Estadística descriptiva de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) del suelo (MPa) a 15 cm de profundidad antes y después del subsolado.

Variables	RMP Antes del subsolado	RMP Después subsolado
Media	1,87	1,82
Error típico	0,17	0,13
Mediana	2,07	1,94
Moda	2,07	2,07
Desviación estándar	0,84	0,63
Coeficiente de variación (%)	45	35

Se pudo observar que el subsolador, además de romper la capa compactada, produciendo grietas, aumentó la rugosidad de la superficie (aunque esto no fue medido), sugiriendo que el pase del subsolador pudo remover la capa más densa de la zona compactada que es la más superficial y descubrir una zona más suave como lo han reportado Batey y McKenzie (2006).

Tal deducción sería consistente con las observaciones de Spoor (2006), quien ha señalado que en suelos que exhiben cierta plasticidad, es difícil romper las capas compactadas, aunque se pueden generar fisuras a un contenido de humedad por debajo del límite plástico.

No obstante, parece evidente la necesidad de otras prácticas adicionales a [la aplicación del subsolado](#), para [mejorar las condiciones de suelo](#), como ha sido señalado por otros autores (Motovalli *et al.*, 2003; Patil y Sheelavantar, 2004; Lipiec *et al.*, 2003; Jin *et al.*, 2007).

Eliminado: la sola

Eliminado: promover una respuesta diferencial de los genotipos a este tratamiento

Con formato: Español (Venezuela)

Es de destacar, que la aplicación del subsolado se realizó a un bajo contenido de humedad, por la baja estabilidad estructural mostrada por el suelo; esto posiblemente redujo el impacto de la práctica en el rompimiento de la capa. Sin embargo, como ha sido resaltado por varios autores (Hamza y Anderson, 2005; Batey y McKenzie, 2006), el uso de maquinaria e implementos para romper capas compactadas, puede ser contraproducente si se realizan a un contenido inadecuado de humedad, sugiriendo su aplicación a un contenido de humedad inferior al límite plástico del suelo.

En este sentido, Hamza y Anderson (2005) han sugerido la aplicación de agentes floculantes como yeso o materia orgánica, cuando se realizan estas prácticas, favoreciendo la reestructuración del suelo subsolado. Además, han indicado el uso de subsoladores de nueva generación con puntas alineadas a diferentes profundidades, para lograr un mayor y perdurable efecto en el rompimiento de las capas compactadas.

4.3. Variables analizadas en la planta

4.3.1. Rendimiento en grano

4.3.1.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

Como resultado del análisis de la varianza (Anexo 8.1.j), se destaca que el rendimiento en grano de los genotipos, fue afectado significativamente con los tratamientos de suplencia de agua (Figura 22). Bajo la condición de riego, se alcanzó un promedio del rendimiento de 4,11 Mg ha⁻¹, mientras que bajo condiciones de estrés se produjo una reducción del 10% en el rendimiento promedio, la cual fue significativa en el análisis de comparación de medias. Es de destacar, que esta diferencia se expresó bajo condiciones de un estrés relativamente ligero, si se compara con los protocolos usados en mejoramiento para la selección de genotipos tolerantes, los cuales incluyen la suspensión de la suplencia de agua hasta el final del ciclo de cultivo; sin embargo, estos protocolos han arrojado diferencias muy amplias entre tratamientos como los reportados por Bolaños y Edmeades (1993a), donde genotipos como C₂, han alcanzado valores promedio de 0.34 Mg ha⁻¹ en condiciones de estrés y 3,8 Mg ha⁻¹ en tratamientos regados.

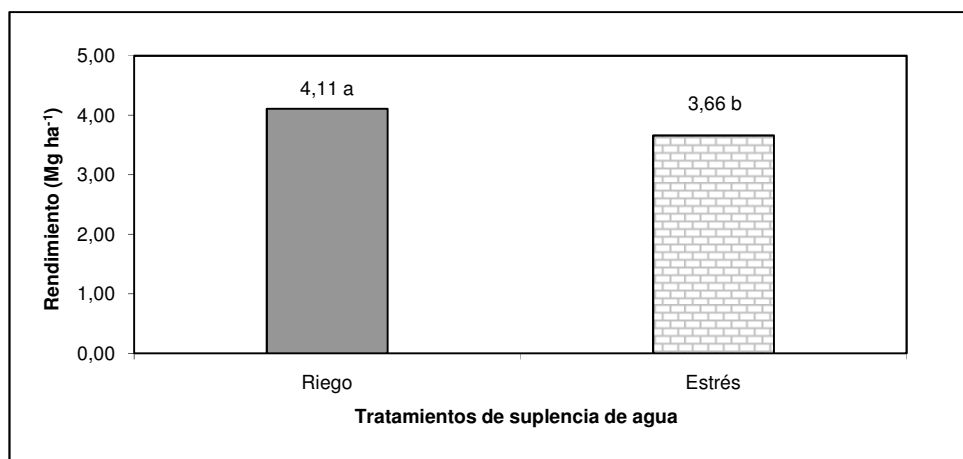


Figura 22. Rendimiento promedio en grano, para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Sin embargo, aunque el rendimiento general alcanzado bajo riego supera la media nacional, puede considerarse bajo, tomando en cuenta que se incluyen dos híbridos de alto potencial

genético como C_3 y C_4 , con potenciales de más de 8 Mg ha^{-1} ; en tal sentido, algunos investigadores como Guillen-Portal *et al.* (2002), han indicado que la correlación de variables como el rendimiento, en genotipos seleccionados bajo ambientes bien regados y su respuesta en otros ambientes puede alcanzar valores bajos; además, sería insuficiente tratar de justificar el valor alcanzado, bajo la premisa del efecto de un solo factor como la suplencia de agua, pues como lo señalan Bänziger *et al.* (2000), el rendimiento depende, tanto del agua disponible como de la eficiencia en el uso por la planta, entre otros factores.

No obstante, la diferencia observada en el tratamiento, refuerza lo planteado por la mayoría de los investigadores en mejoramiento de maíz (Edmeades y Bänziger, 1996; Bolaños y Edmeades, 1993a) quienes afirman que el rendimiento es la característica más afectada en condiciones de estrés hídrico.

4.3.1.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

El análisis de varianza en los tratamientos de preparación de suelo, mostró que no hubo variación significativa en los rendimientos (Figura 23), por lo que el subsolado no influyó de manera importante en el comportamiento de esta variable, arrojando valores similares para ambos tratamientos, los cuales no alcanzaron los 4 Mg ha^{-1} . Se esperaría que la compactación afectara genotipos como C_3 y C_4 por ser genotipos híbridos caracterizados por un desarrollo radical vigoroso (Hamza y Anderson, 2005), y donde la aplicación de subsolado pudo favorecer esta variable; sin embargo, los resultados indican que los efectos producidos en estos genotipos, no resultaron importantes para reflejar diferencias en el tratamiento de preparación de suelo.

Aunque en el tratamiento de subsolado no se observó algún efecto importante que pueda expresarse en los rendimientos de los genotipos de alto potencial, es evidente una reducción importante en comparación con los rendimientos potenciales para estos genotipos (Cuadro 5), la cual equivaldría a un 50% aproximadamente.

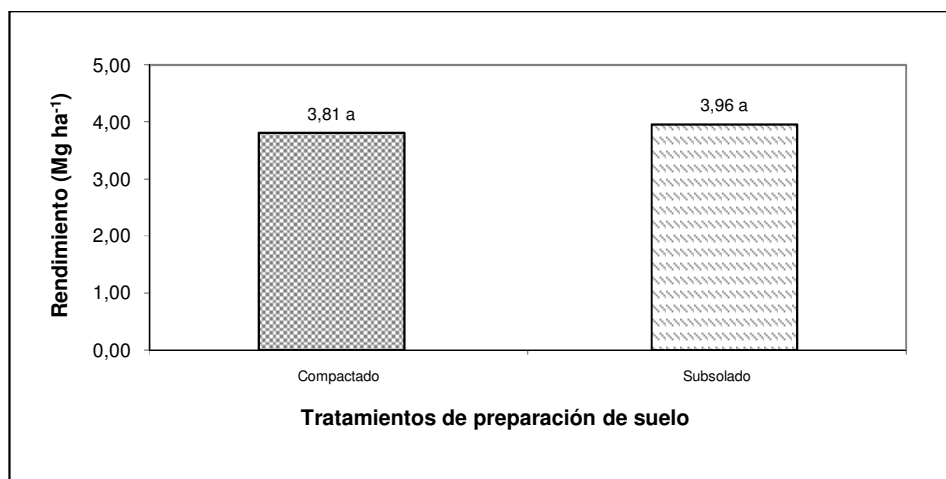


Figura 23. Rendimiento promedio en grano para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.1.3. Efecto de los tratamientos de genotipos

Al evaluar el rendimiento entre los tratamientos de genotipos, el análisis de varianza no evidenció diferencias estadísticas, indicando la comparación de medias, valores estadísticamente iguales entre ellos (Figura 24). Este resultado, estuvo condicionado en parte a la mayor variabilidad observada dentro de los tratamientos (Anexo 8.1.j), propia de las diferencias genotípicas y fenotípicas de estos materiales, como se indicó previamente.

No obstante, resalta la similitud de los rendimientos en todos los genotipos, teniendo diferencias importantes tanto en el rendimiento potencial, como en las características morfológicas y requerimientos de cultivo, donde tanto las limitantes físicas de suelo, como la disponibilidad de agua en el suelo, se esperaría que afectaran de forma importante a los genotipos más exigentes como C₃ y C₄, ya que C₁ y C₂ además de tener una estructura de raíces menos profunda y densa, disponen de mecanismos adaptativos que les favorecen su adaptabilidad y resistencia al déficit hídrico (Bolaños y Edmeades, 1993a).

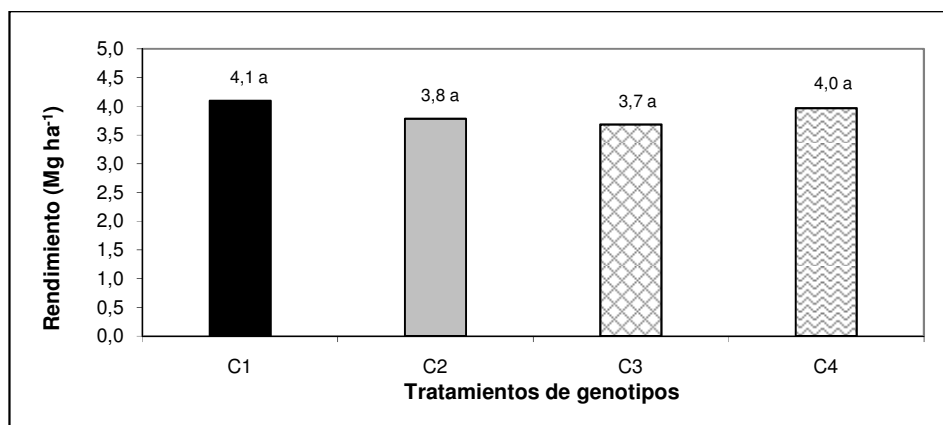


Figura 24. Rendimiento promedio en grano para los tratamientos de genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.1.4. Interacciones entre tratamientos

El análisis de varianza no indicó diferencias significativas en la interacción de los tratamientos (Anexo 8.1.j), resulta interesante analizar las mismas, ya que existen resultados que ayudan a entender el comportamiento de la variable analizada. El genotipo C₃, aunque mostró valores promedios diferentes entre los tratamientos de suplencia de agua (Figura 25), su alto coeficiente de variación no permitió mostrar diferencias significativas para la interacción suplencia de agua-genotipos (Anexo 8.1.j). Asimismo, cabe resaltar que el genotipo C₄ no mostró como era de esperarse diferencias significativas en el tratamiento de suplencia de agua, con valores de rendimiento promedio muy cercanos. Esto hace pensar que el genotipo C₄ pudo escapar del efecto de estrés con algún mecanismo compensatorio, permitiéndole una rápida recuperación.

El genotipo C₁, mostró un enrollamiento de las hojas en condiciones de baja humedad del suelo y durante las horas del mediodía (Anexo 8.2.n), cuando se presentaron las mayores temperaturas atmosféricas, el cual es una especie de mecanismo de escape ante el estrés hídrico. Este mecanismo, ya había sido indicado por algunos autores como Bänziger y Edmeades (1996), quienes trabajando con líneas tropicales de maíz asociaron los genotipos con mayor biomasa y grano, con una mayor eficiencia fotosintética producida por la acción de mecanismos como el enrollado de hojas. Otros investigadores como Climenti *et al.* (1996),

Eliminado: significativas

Eliminado: bien marcados

Eliminado: estos fueron muy variables, produciendo un

Eliminado: que

Eliminado: encontrar

Eliminado: por

Eliminado: lo cual era de esperarse

han relacionado las diferencias en rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico al ajuste osmótico de los genotipos, mecanismo a través del cual regulan el contenido relativo de agua en la hoja.

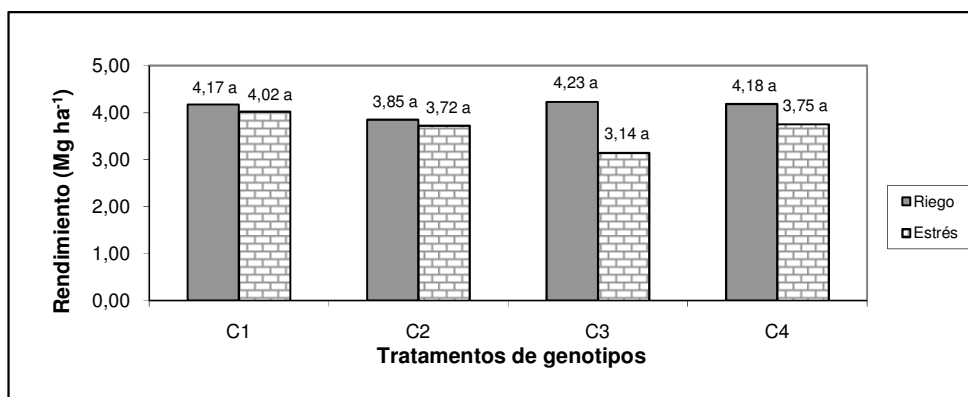


Figura 25. Rendimiento promedio en grano, para la interacción de tratamientos de genotipos - suplencia de agua. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Por su parte, el genotipo C₂ arrojó los valores más bajos de rendimiento para el tratamiento de riego; sin embargo, bajo condiciones de estrés el valor promedio de rendimiento fue mayor que el alcanzado por C₃, lo que sugiere un nivel de tolerancia importante bajo estas condiciones como lo han indicado Bolaños y Edmeades (1993a), por evolución genética o por mecanismos fisiológicos como la conductancia estomática, según lo ha sugerido Gutiérrez *et al.* (1996).

Resalta el comportamiento del genotipo C₄, ya que se esperaría, una reducción en el rendimiento bajo condiciones de estrés, por ser de alto potencial genético y con altos requerimientos tecnológicos. Esto podría asociarse a la existencia de mecanismos de recuperación de dicho genotipo ante el estrés.

De manera general, podría señalarse que los tratamientos de preparación de suelo y de genotipos, no generaron efectos importantes que afectaran la variable rendimiento, siendo la suplencia de agua el único en mostrar un efecto significativo en su expresión. Estos resultados son concordantes con los obtenidos por otros investigadores (Bolaños *et al.*,

1993; Bolaños y Edmeades, 1993a), quienes afirman que el rendimiento es una variable compleja, siendo la suplencia de agua y de nitrógeno, los factores que más afectan su expresión.

4.3.2. Intervalo antésis – estigma (ASI)

La etapa de floración aunque se inició a los 51 días después de la siembra con la antésis en el genotipo C₂, la mayoría de los genotipos la iniciaron 7 días después, abarcando un período total de 16 días (Cuadro 8). La emergencia de la inflorescencia masculina en todos los genotipos duró en promedio 7 días; sin embargo, la emergencia de la inflorescencia femenina fue más variable, iniciándose en promedio 3 días después de la antésis, con una duración promedio de 5 días y destacando variaciones importantes entre los tratamientos.

4.3.2.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

El análisis de varianza para el ASI, indicó diferencias significativas en los tratamientos de suplencia de agua (Anexo 8.1.k), alcanzando el tratamiento con riego un promedio de 3,21 días en dicho intervalo, el cual fue significativamente más bajo al promedio alcanzado bajo el tratamiento de estrés que fué de 4,5 días(Figura 26).

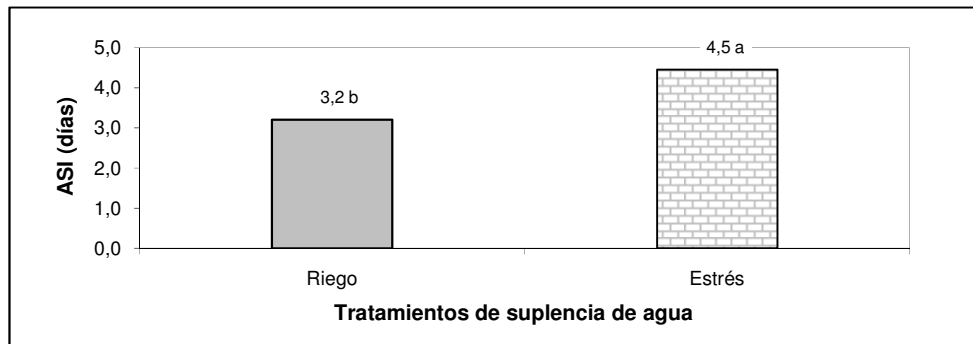


Figura 26. Valores promedio del ASI para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Tal diferencia significó un aumento de 1,3 días en el ASI, bajo condiciones de estrés hídrico, lo que es equivalente al 29%, incrementando la probabilidad de fallas en la polinización de los genotipos, y con ello el rendimiento de los mismos. Estos resultados, coinciden con los

Eliminado: Se encontraron diferencias significativas

Eliminado: sobre el ASI

Eliminado: i

Eliminado: Tal diferencia indica la reducción de 1,3 días en el ASI, bajo condiciones de estrés hídrico, aumentó la probabilidad de fallas en la polinización de los genotipos, afectando

Bajado [1]: el rendimiento de los mismos.

Con formato: Espacio Después: 18 pto

Movido (inserción) [1]

obtenidos por Bolaños y Edmeades (1996), quienes bajo el tratamiento de estrés intermedio, lograron valores promedio de 4,6 días en relación a 2,3 días del tratamiento con riego. [Por su parte](#) San Vicente *et al.* (1999), trabajando con líneas tropicales precoces, obtuvieron valores promedio de 3,5 días bajo estrés intermedio, correlacionándose en forma negativa y altamente significativa con el rendimiento en grano. [Asimismo, Chapman y Edmeades \(1999\) indicaron una correlación de 0.89 entre el ASI y el rendimiento en poblaciones de maíces tropicales.](#)

Con formato: Español (Venezuela)

4.3.2.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

Los resultados para los tratamientos de preparación de suelo, no evidenciaron diferencias para esta variable (Anexo 8.1.k), indicando que la aplicación de subsolado no alteró la sincronía de la emergencia de los órganos florales. Al comparar los promedios alcanzados para estos tratamientos (Figura 27), destaca que los valores de ASI en ambos tratamientos, fueron similares con valores cercanos a los 4 días. Para Gardner *et al.* (1999), el principal efecto de la compactación de suelo en la planta, estará orientado a las limitaciones en el desarrollo de raíces; sin embargo, su expresión estaría condicionada a las diferencias fisiológicas de los genotipos analizados, como es el caso del genotipo C₂ (Bolaños y Edmeades, 1993a).

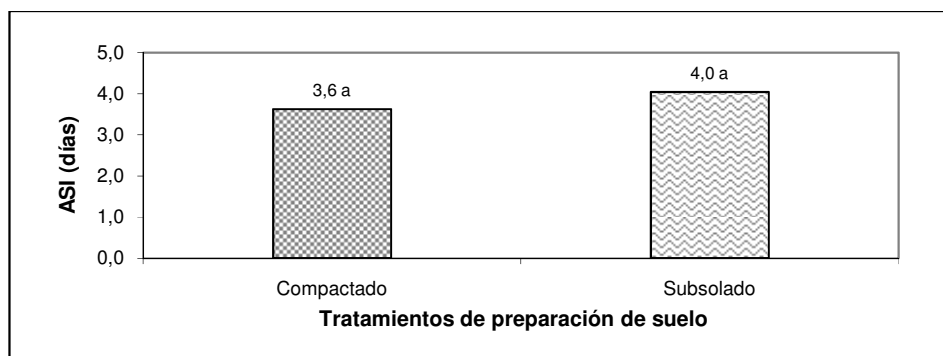


Figura 27. Valores promedio del ASI para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.2.3. Efecto de los tratamientos de genotipos

Al analizar, el comportamiento de los genotipos (Figura 28), C₁ destacó con el promedio más bajo para el ASI, con una diferencia significativa de 1 día, en comparación con C₃ y C₄, lo cual se corresponde con los valores de rendimiento alcanzados por C₁, sobresaliendo con el promedio más alto. Esta característica, revela que el genotipo C₁ mantuvo la sincronía en la emergencia de los órganos reproductivos en un valor promedio de tres (3) días por debajo de C₂, mientras C₃ y C₄, superaron los cuatro (4) días, indicando diferencias fenotípicas entre ambos grupos de genotipos.

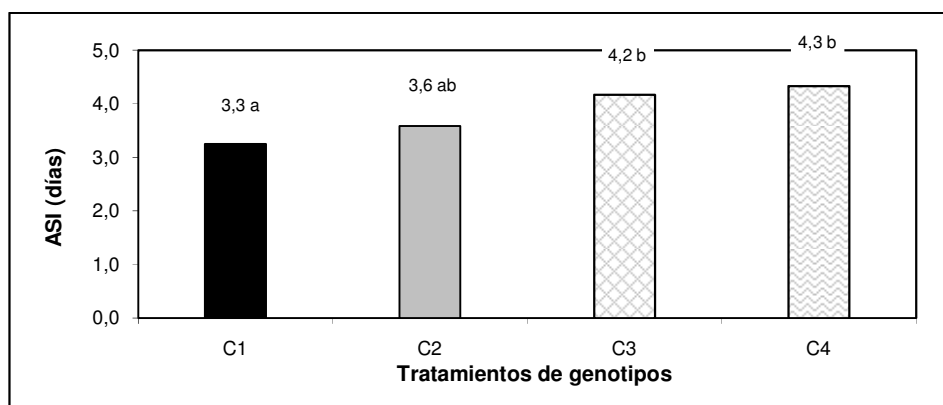


Figura 28. Valores promedio del ASI para los tratamientos de genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.2.4. Interacciones entre tratamientos

Aunque el análisis de varianza, no indicó diferencias significativas en las interacciones simples (Anexo 8.1.k), resulta interesante revisar la interacción triple de genotipos con los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo (Figura 29), donde resalta el genotipo C₁ con el valor promedio de ASI más bajo registrado (2 días) cercano a los resultados bajo las interacciones del tratamiento de riego.

En el tratamiento de riego, los genotipos expresaron valores homogéneos para ambos tratamientos de preparación de suelo, alrededor de los 3 días, a excepción de C₄ que superó los 4 días bajo compactación, diferenciándose de los demás genotipos. Por el contrario, bajo

el tratamiento de estrés, los valores de ASI variaron en un rango entre 6 y 2 días, lo que demuestra el efecto de la interacción con los tratamientos de preparación de suelo y genotipos y cuya expresión, marcó las diferencias para obtenidas en el tratamiento de suplencia de agua.

La mayor diferencia de C₁ se mostraron en el tratamiento estrés-compactado con diferencias superiores a los 3 días en comparación a los valores de los genotipos C₃ y C₄, que resultaron significativas al 6%. Estas diferencias no se observaron en el tratamiento estrés-subsolado, sugiriendo que el efecto más importante para la expresión del ASI fue el estrés hídrico, siendo muy afectados C₃ y C₄ para ambos tratamientos de preparación del suelo. Cabe destacar que el genotipo C₄, aunque fue afectado para esta variable por la compactación en el tratamiento de riego, en el tratamiento de estrés hídrico el subsolado no produjo efecto positivo.

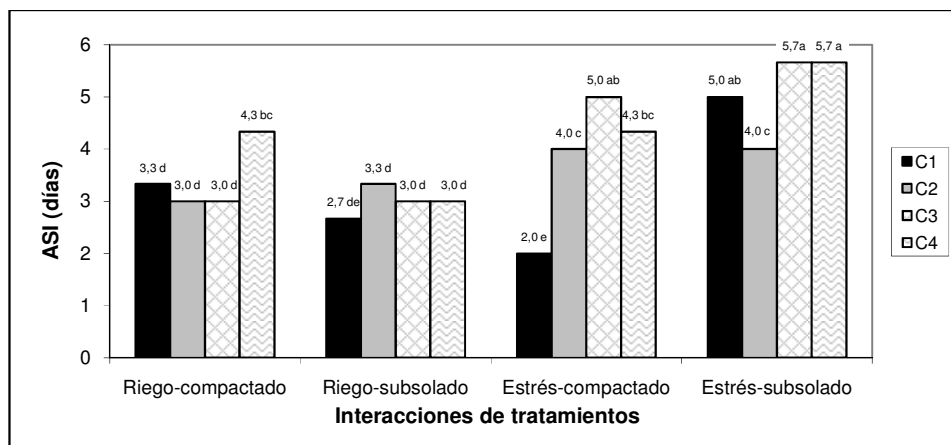


Figura 29. Valores promedio del ASI para la interacción de tratamientos de suplencia de agua, preparación de suelo y genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 6\%$).

C₂ por su parte, se mostró estable para todas las interacciones de tratamientos, aunque el ASI aumentó ligeramente para el tratamiento de estrés. Según Edmeades *et al.* (1996), en estos genotipos seleccionados como tolerantes a sequía, se ha observado que el sistema fotosintético, se recupera rápidamente del estrés, mostrando una mayor eficiencia en el uso

Eliminado: ¶

de la radiación, y acortando el tiempo para la aparición de la floración femenina, lo que se traduce en una reducción del ASI. Bajo este criterio, podría señalarse que el genotipo C₂, tuvo la capacidad de recuperación ante el estrés para reducir su efecto, acelerando la aparición de la inflorescencia femenina y con ello el ASI. Asimismo, los resultados obtenidos para C₁, indicarían similitudes con C₂ sobre los mecanismos de escape del efecto tanto del estrés, como de la compactación en la sincronía floral. En tal sentido, Bolaños *et al.* (1993), indican que cambios en el ASI, estarían muy relacionados a la posibilidad de la planta para redistribuir la biomasa hacia la inflorescencia femenina.

Para Bolaños y Edmeades (1996), el ASI es la característica que ha mostrado más fuerte y consistente correlación genética con el rendimiento en grano, alcanzando niveles de correlación de -0.53 ó más, en otros estudios. Esto puede explicar en parte la consistencia en los rendimientos de C₁ en el tratamiento de estrés y un bajo ASI, así como el bajo rendimiento en C₃, y elevado ASI.

4.3.3. Índice de área foliar (IAF)

4.3.3.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

El análisis de varianza del IAF, mostró diferencias significativas en los valores promedios de los tratamientos de suplencia de agua, tanto para el total de las hojas por planta, como para las hojas verdes (Anexo 8.1.l,m), manifestándose una reducción para ambas variables bajo la condición de estrés. La comparación de media mostró que el el IAF total (IAF_t) alcanzó un valor promedio de 1,94 para el tratamiento de estrés, en comparación al tratamiento de riego el cual superó en 10% este valor (Figura 30). Esta diferencia entre tratamientos fue mayor en el IAF verde (IAF_v), con un valor máximo de 1,66, bajo la condición de riego (Figura 31).

Aunque los valores registrados fueron superiores a 0,6, el cual según Ascencio (2000), se ha reportado como mínimo crítico para saturación de luz en la planta de maíz, todavía son bajos a lo indicado por Lafitte (2001) para genotipos tropicales, quien señala valores cercanos a 4, cuando la planta de maíz alcanza la mayor eficiencia en la intercepción de la radiación. Por otra parte, Elings (2000) ha reportado valores inferiores en genotipos tropicales de maíz bajo condiciones de baja disponibilidad de agua ó déficit de nitrógeno, los cuales oscilaron entre 2,2 y 6.5, aun así son comparables con los obtenidos para el genotipo La Posta Sequía (C₂),

evaluado en su investigación (2,8). No obstante, en dicho estudio algunos híbridos alcanzaron un IAF total superior a 6, por lo que podrían considerarse valores bajos para este índice en la presente investigación.

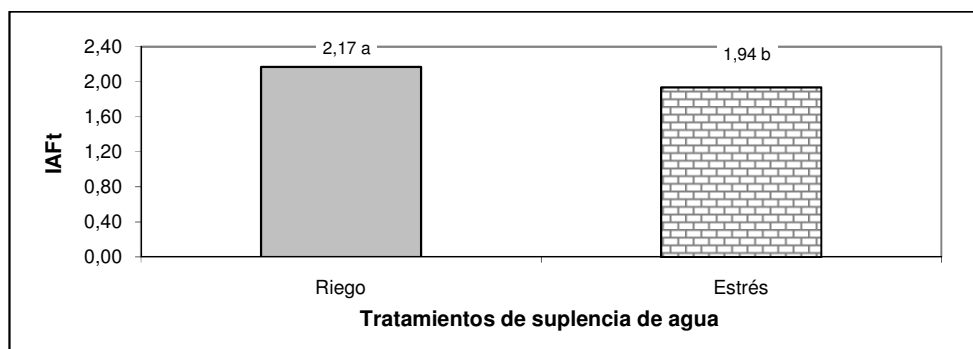


Figura 30. Valores promedio del Índice de Área Foliar Total (IAFt) para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas, muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Los resultados obtenidos, reafirman lo señalado por Tardieu et al. (2004), según lo cual las plantas sujetas a déficit hídrico, reducen la tasa de expansión foliar para hacer un uso más eficiente del agua disponible, aunque con ello afecta su crecimiento. Sin embargo, existen genotipos con mecanismos reguladores como el enrollado de las hojas, bajo condiciones de déficit hídrico, sin afectar en mayor grado la expansión foliar, como lo indican Earl y Davis (2003).

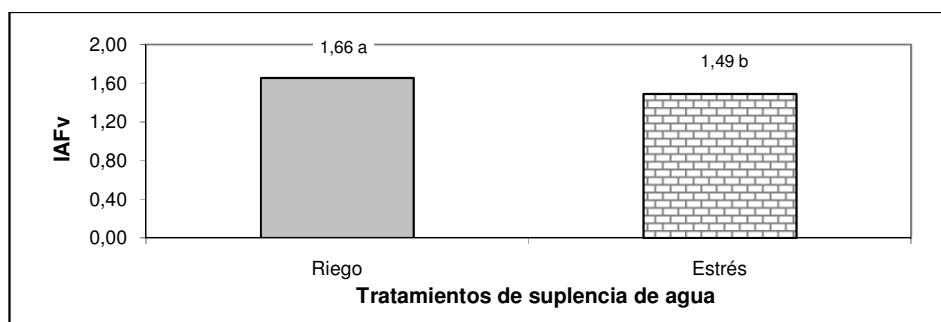


Figura 31. Valores promedio del Índice de Área Foliar Verde (IAFv) para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas, muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.3.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

El análisis de varianza en los tratamientos de preparación del suelo, no evidenció diferencias estadísticas significativas con esta variable, tanto para el IAFt como el IAFv (Anexo 8.1.1,m). Cabe destacar que en la comparación de medias (Figuras 32 y 33), aunque los valores son semejantes a los mostrados en los tratamientos de suplencia de agua, el alto coeficiente de variación resultante impidió obtener diferencias estadísticas para los tratamientos de preparación de suelo.

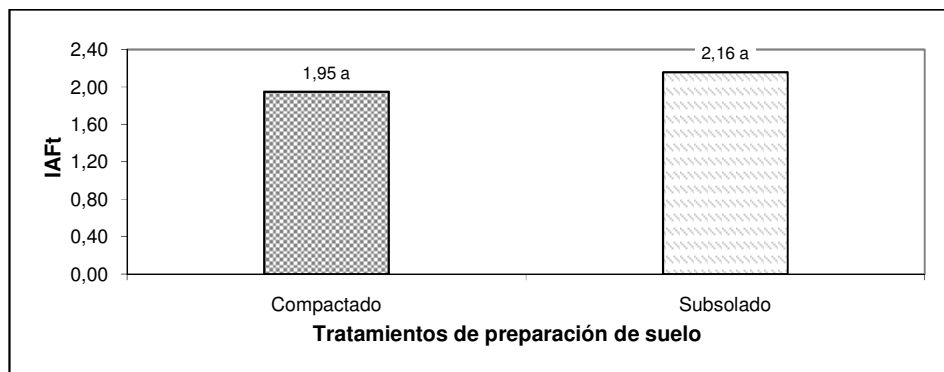


Figura 32. Valores promedio del Índice de Área Foliar Total (IAFt) para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

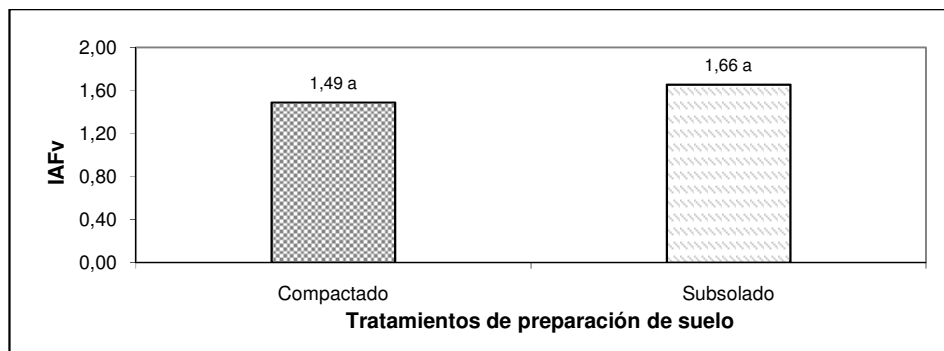


Figura 33. Valores promedio del Índice de Área Foliar Verde (IAFv) para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.3.3. Efecto de los tratamientos de genotipos

El comportamiento de los genotipos para la variable IAFt no resultó estadísticamente diferente según el análisis de la varianza (Anexo 8.1.1,m). Los genotipos alcanzaron valores alrededor de 2, con pocas diferencias entre sí (Figura 34).

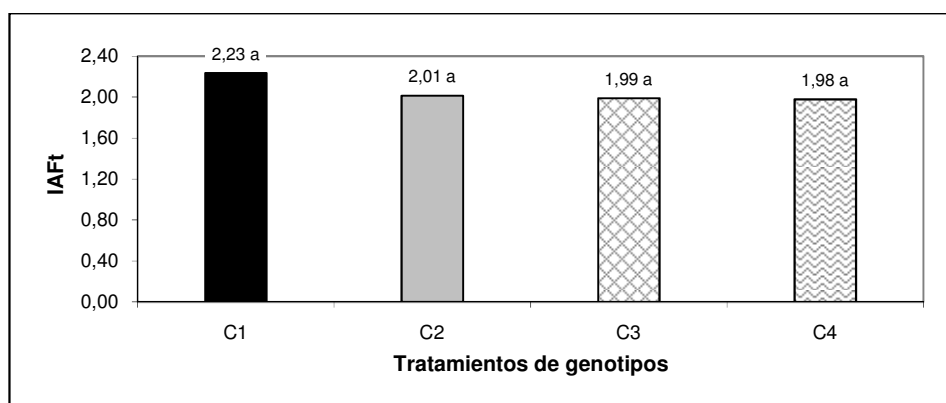


Figura 34. Valores promedio del Índice de Área Foliar Total (IAFt) para los tratamientos de genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.3.4. Interacciones entre tratamientos

Los resultados de la interacción de genotipos con la suplencia de agua (Figura 35), aunque mostraron una reducción en el IAFt en todos los genotipos bajo condiciones de estrés, no fueron estadísticamente diferentes ((Anexo 8.1.1,m), lo que enfatiza el efecto de la suplencia de agua en esta característica independientemente del genotipo analizado. Es de destacar, la similitud en los valores para el genotipo C₄, considerado de gran requerimiento tecnológico como la adecuada suplencia de agua.

Destaca asimismo, que los genotipos C₂ y C₃, fueron los más afectados por el estrés hídrico, reduciendo el valor del IAFt en un 20% y 15% respectivamente. Aunque, esta reducción podría ser importante, valores similares han sido reportados por Elings (2000) bajo condiciones de adecuada suplencia de agua y niveles medios de nitrógeno en el suelo; aun así, podría pensarse en un mayor efecto fisiológico en el funcionamiento de la planta en genotipos como C₃ con alta capacidad de rendimiento, mientras que C₂ que tiene

mecanismos de escape ante el estrés, esta variable puede tener un menor efecto en su capacidad fotosintética.

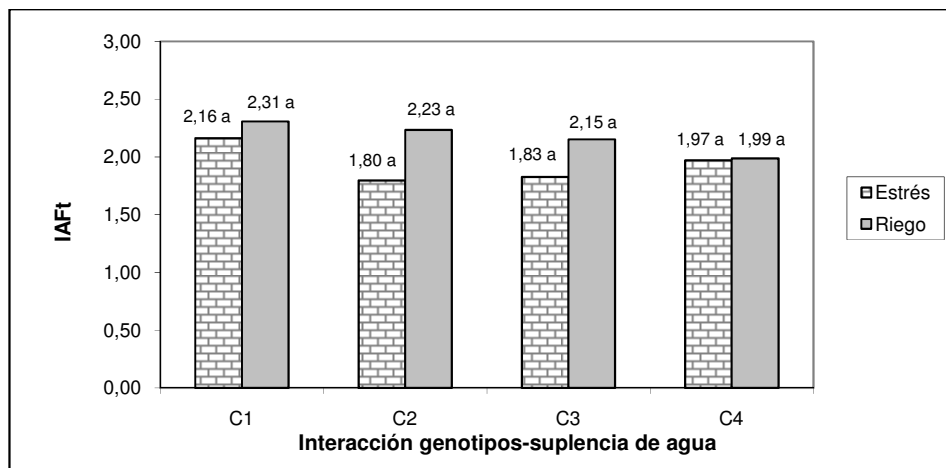


Figura 35. Valores promedio del Índice de Área Foliar Total (IAFt) para la interacción de los tratamientos de genotipos - suplencia de agua. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Ahora bien, al analizar los componentes del cálculo de este índice (Cuadro 17), es notable que las diferencias derivan del área de la hoja más grande; en otras palabras, el estrés redujo significativamente el área foliar de la hoja más grande de las plantas, lo que produjo un efecto directo de reducción en el IAF. Este efecto tiene similitud a lo encontrado por Sobrado (1986) en plantas jóvenes de maíz, aunque no en la magnitud indicada por esta investigadora, quien ha propuesto, que la expansión foliar en maíz es muy sensible al bajo turgor celular, y genotipos capaces de mantener una alta presión de turgor bajo condiciones de estrés hídrico, podrían prolongar su crecimiento foliar. Esto conlleva a considerar que los genotipos evaluados se ajustaron a la condición de estrés, con mecanismos de escape variables como el enrollado ya indicado de C₁, ya que ninguno mostró diferencias en el IAFt entre los tratamientos de suplencia de agua en forma individual, siendo afectados todos de forma general por el estrés de humedad.

Cuadro 17. Valores promedios de los parámetros considerados para calcular el IAF en los tratamientos de suplencia de agua.

Tratamiento	Número de hojas		Área de la hoja más grande (cm ²)
	Total	Verdes	
Riego	17,4 ± 0,20	10,4 ± 0,18	540,4 ± 12,56 <i>a</i>
Estrés	17,0 ± 0,18	10,2 ± 0,15	489,9 ± 15,34 <i>b</i> *

Letras diferentes muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Sin Superíndice / Subíndice

Con formato: Sin Superíndice / Subíndice

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Párrafo de lista, Izquierda, Sangría: Izquierda: 0,25 cm, Espacio Después: 18 pto, Interlineado: sencillo, Sin viñetas ni numeración, Dividir palabras

4.3.4. Biomasa aérea

4.3.4.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

En plantas jóvenes (45 dds) el análisis de varianza no mostró un efecto significativo de los tratamientos de suplencia de agua en la biomasa aérea (Anexo 8.1,o), resaltando una reducción bajo condiciones de estrés hídrico en un 17%, con relación al tratamiento de riego(Figura 36). Amos y Walters (2006) han indicado que en estudios de raíces y biomasa aérea en maíz, a los 45 días se ha alcanzado alrededor del 40% del peso total de las raíces y la parte aérea, y se han registrado cambios donde el estrés hídrico ha afectado en forma negativa a esta variable, hasta en un 17,4%.

Eliminado: de humedad

Eliminado: la mayoría de los resultados en

Eliminado: en esta etapa

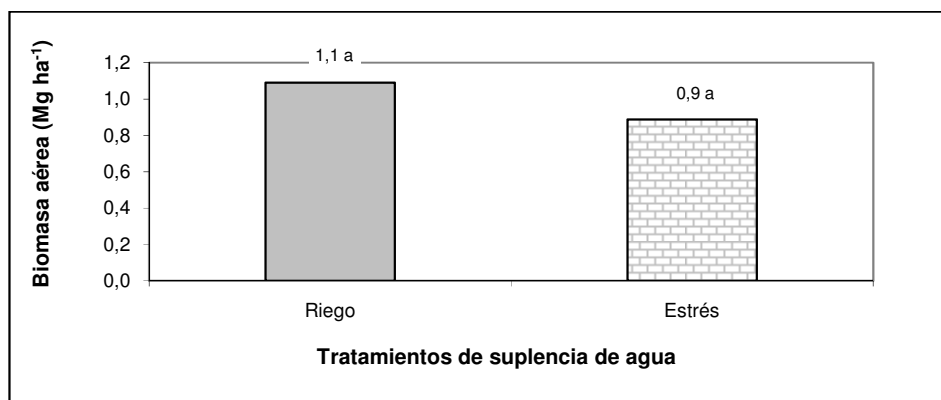


Figura 36. Valores promedio de la biomasa aérea a los 45 dds., para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas difieren significativamente ($\alpha = 5\%$).

Esta tendencia se mantuvo a través del tiempo, haciéndose mayor la diferencia a través del ciclo de cultivo, lo que sugiere que el estrés hídrico en la etapa prefloral, afectó significativamente el desarrollo de las plantas (Figura 37). En plantas adultas el tratamiento de estrés produjo una reducción del 30% en la biomasa aérea con relación a las que crecieron bajo riego continuo. Es necesario destacar que para el momento del muestreo a los 45 dds, el estrés por déficit hídrico llevaba 5 días, con lo cual en plantas adultas este efecto pudo expresarse con mayor impacto.

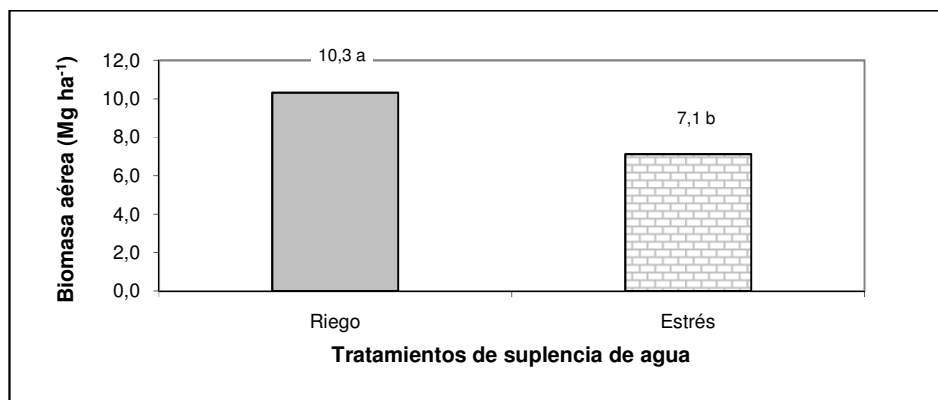


Figura 37. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds en los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas minúsculas difieren significativamente ($\alpha = 5\%$).

4.3.4.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

La comparación de medias en el tratamiento de preparación de suelo, destacó una reducción de la biomasa aérea por la compactación, de forma altamente significativa, con que alcanzó niveles de más del 33%, con relación a la aplicación de subsolado (Figura 38). Estos resultados son consistentes con los encontrados por Young et al. (1997), en trigo, donde el aumento de la resistencia mecánica en el suelo redujo en 36,2% la tasa de elongación foliar, aún bajo adecuada suplencia de agua y nutrientes, sugiriendo la hipótesis de un efecto negativo directo sobre el crecimiento foliar. Según tal evidencia, esta importante reducción en la acumulación de biomasa en plantas jóvenes, mostraría la alta sensibilidad de los genotipos a la compactación presente en este suelo.

Movido (inserción) [2]

Eliminado: Necesario e

Eliminado: ¶

Eliminado: esta etapa

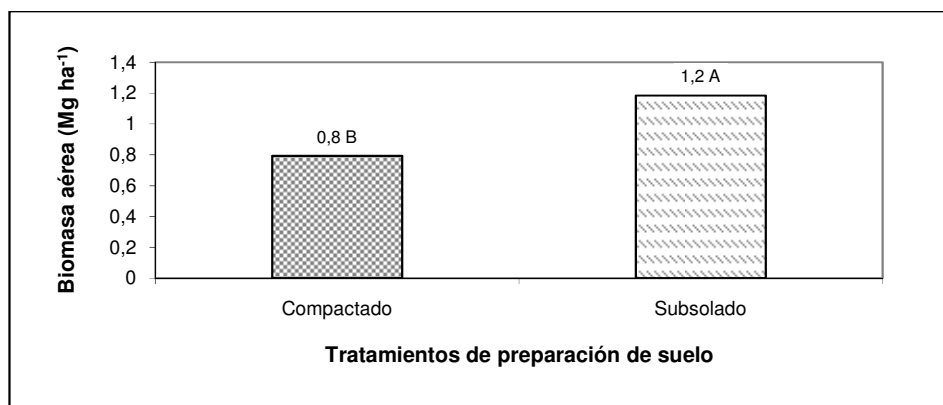


Figura 38. Valores promedio de la biomasa aérea a los 45 dds., para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas difieren en forma altamente significativa ($\alpha = 1\%$).

Con formato: Espacio Después: 18 pto

La diferencia inicial en la biomasa aérea a los 45 días, se incrementó en las plantas adultas (Figura 39), destacando una reducción de la biomasa del 20%, por efecto de la compactación del suelo.

Eliminado: Este efecto

Eliminado: aumentando las diferencias entre los tratamientos., mientras la

Eliminado: fue del 20%.

Subido [2]: Necesario es destacar que para el momento del muestreo a los 45 dds, el estrés por déficit hídrico llevaba 5 días, con lo cual en plantas adultas este efecto pudo expresarse con mayor impacto.

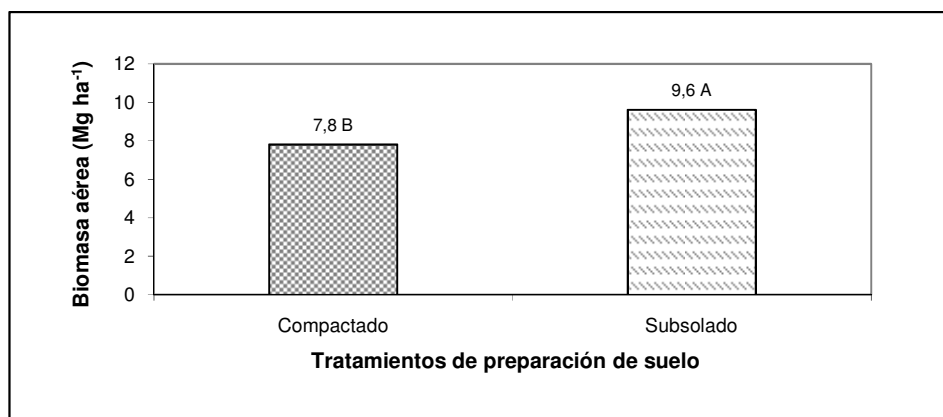


Figura 39. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds en los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas difieren en forma altamente significativa ($\alpha = 1\%$).

Por el contrario, el efecto de la compactación del suelo estaba presente desde el momento de la siembra de los genotipos y solo pudo haberse limitado por el limitado desarrollo de las

raíces en dicho momento. Sin embargo, no debe descartarse que por efecto de la compactación y la restricción en el crecimiento de raíces en la capa superficial, se haya acentuado el efecto por estrés de humedad como lo indica Tardieu (1994).

4.3.4.3. Efecto de los tratamientos de genotipos

La comparación de medias entre los genotipos de plantas de 45 días (Figura 40), no reveló diferencias estadísticas con relación a la biomasa aérea. Estos resultados indican que en plantas jóvenes el efecto inicial del estrés y la compactación fue compensado entre los genotipos, afectado por las variaciones fenotípicas ya indicadas tanto del sistema y desarrollo de raíces como el vigor, lo que se relaciona en forma directa con la biomasa aérea.

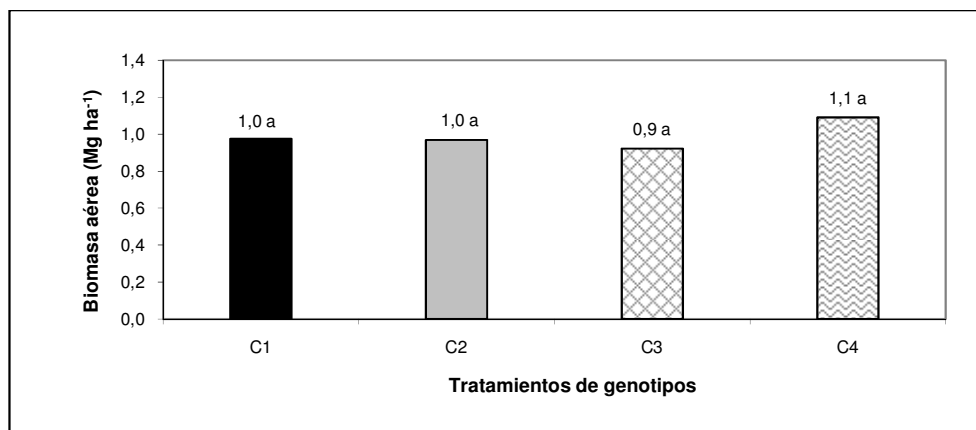


Figura 40. Valores promedio de la biomasa aérea a los 45 dds en los tratamientos de [genotipos](#). Letras distintas difieren en forma significativa ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: preparación de suelo

En plantas adultas, se reflejaron diferencias significativas para esta variable (Figura 41), destacando el genotipo C₂, como el de mayor promedio de biomasa aérea, mientras C₁ y C₃ resultaron con los valores más bajos. El valor promedio alcanzado por el genotipo C₂, es similar a valores promedio reportados por otros investigadores (Bolaños y Edmeades, 1993a); sin embargo, los valores registrados en genotipos como C₃ y C₄, están muy por debajo a los reportados en genotipos comerciales de alto rendimiento los cuales frecuentemente superan los 20 Mg ha⁻¹ (Yi *et al.*, 2010; Amos y Walters, 2006).

Este resultado, indicaría, que el genotipo C₂, fue capaz de recuperarse del poco desarrollo inicial, ajustando de forma importante su metabolismo, para reducir el impacto producido por el estrés hídrico. Cabe resaltar que C₂, dentro de su proceso de selección como tolerante a sequía, fue poco afectado en su configuración genotípica para la producción de biomasa, por lo que estos cambios derivados de los tratamientos, pueden atribuirse a una respuesta directa de ajuste y no por su condición de tolerancia per se (Bolaños *et al.*, 1993).

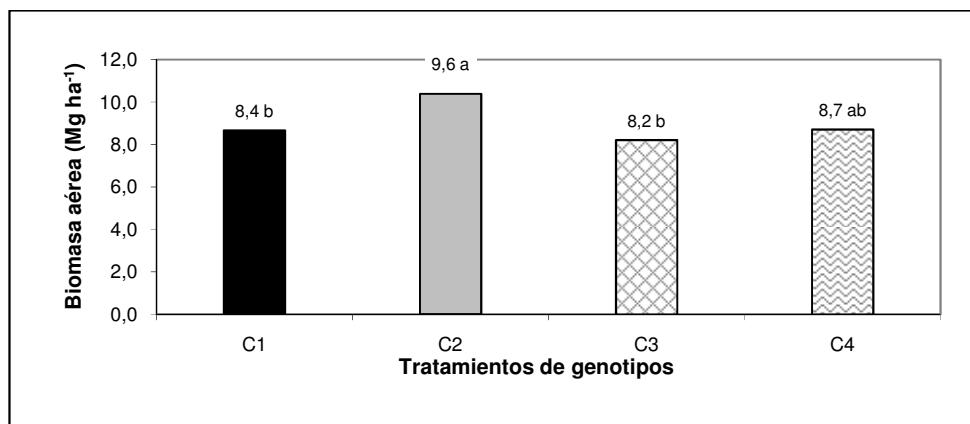


Figura 41. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds., en los tratamientos de genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.4.4. Interacción entre tratamientos

Con relación al comportamiento de los genotipos en etapa inicial a los 45 dds (Figura 42), se evidenciaron diferencias significativas en la interacción de los tratamientos de suplencia de agua y genotipos (Anexo 8,1,n), destacando los genotipos C₁ y C₂ con la menor biomasa aérea bajo condiciones de estrés, siendo el C₂ el más afectado inicialmente, el cual redujo en 50% la biomasa en condiciones de estrés con relación al tratamiento bajo riego. Además el promedio del genotipo C₂ resultó el promedio más bajo de todos los tratamientos.

Destaca que los genotipos C₃ y C₄ no mostraron diferencias en los tratamientos de suplencia de agua en esta primera etapa como se esperaría, dados los elevados requerimientos hídricos que presentan estos genotipos con alto potencial de producción. Resalta además, que la biomasa en C₄, fue similar a la alcanzada por los otros genotipos en condiciones de

riego, mientras C₃ alcanzó valores incluso inferiores, sugiriendo que en esta primera etapa, las diferencias para estos genotipos, podrían estar relacionadas a otras variables ya que los valores alcanzados fueron comparables al genotipo C₂ de menor vigor.

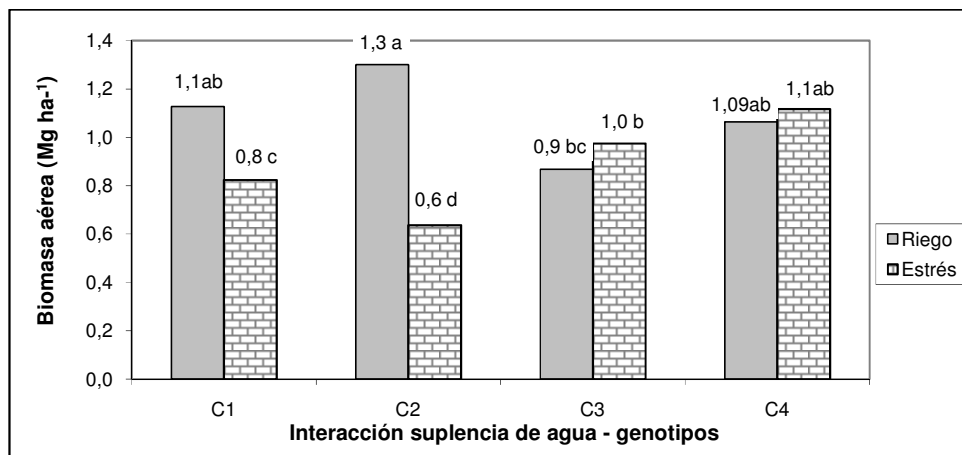


Figura 42. Valores promedio de la biomasa aérea a los 45 dds., para la interacción de los tratamientos de suplencia de agua-genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Eliminado: - suplencia de agua.

No obstante, al analizar la interacción de los genotipos con los tratamientos de suplencia de agua en plantas adultas (Figura 43), el genotipo C₄, presentó el mayor valor de biomasa aérea en condiciones de riego, siendo estadísticamente superior al resto de los materiales, indicando una importante recuperación del limitado desarrollo inicial. Destaca en el comportamiento de este genotipo la reducción de la biomasa aérea en un 50% bajo el tratamiento de estrés hídrico, manifestando una alta sensibilidad de esta variable en dicho genotipo.

Con formato: Espacio Antes: Automático, Después: Automático, Agregar espacio entre párrafos del mismo estilo

Los resultados en general, arrojan una serie de evidencias, que son coherentes con las variables previamente analizadas, destacando el efecto negativo de las condiciones de estrés hídrico y de compactación en el desarrollo de la planta. De igual forma, se muestran diferencias consistentes entre genotipos y su capacidad para recuperarse de tales condiciones, que les permitieron alcanzar una importante acumulación de biomasa aérea y mejorar el rendimiento, a pesar del efecto adverso inicial en algunos tratamientos.

Movido (inserción) [3]

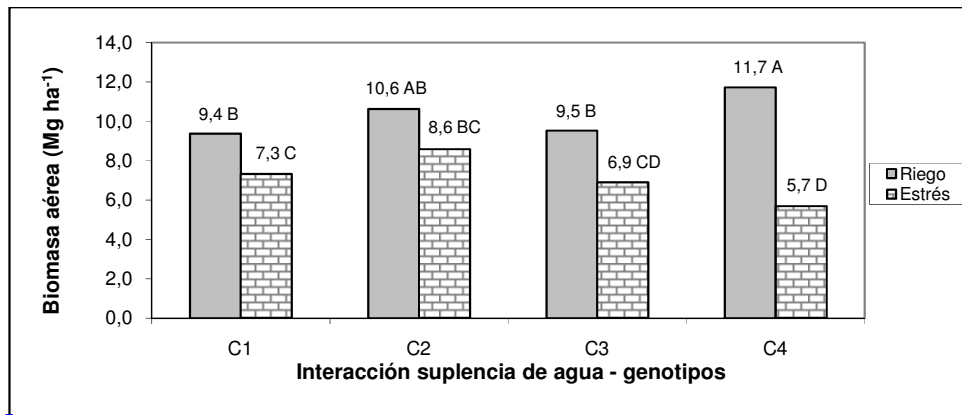


Figura 43. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds., para la interacción de los tratamientos de suplencia de agua-genotipos. Letras distintas muestran diferencias altamente significativas ($\alpha = 1\%$).

Destaca asimismo, que los resultados obtenidos con la biomasa en plantas adultas y el rendimiento ya reportado, coinciden con la relación biomasa-grano observada por Bolaños y Edmeades (1993a) en genotipos de maíz, quienes encontraron una ecuación de regresión que al aplicarse al caso analizado para una biomasa de 10 a 12 Mg ha⁻¹, correspondería un rendimiento en grano, cercano a los 4 Mg ha⁻¹, como es el caso bajo estudio.

Los resultados para la variable biomasa aérea en la interacción de tratamientos preparación de suelo-genotipos en plantas adultas (Figura 44), indicó que todos los genotipos fueron afectados negativamente por la compactación, aunque en forma significativa solo el genotipo C₄ fue el afectado, con el menor valor promedio de 6,8 Mg ha⁻¹ en el tratamiento compactado. El resultado demuestra la mayor respuesta de este genotipo al subsolado, manifestando un aumento en el desarrollo de la planta. Cabe destacar, que el genotipo C₂ alcanzó un promedio de biomasa aérea similar al logrado por C₄ en el tratamiento subsolado, resaltando el efecto favorable del mismo para ambos genotipos.

Eliminado: ¶

Eliminado: - suplencia de agua

Subido [3]: Los resultados en general, arrojan una serie de evidencias, que son coherentes con las variables previamente analizadas, destacando el efecto negativo de las condiciones de estrés hídrico y de compactación en el desarrollo de la planta. De igual forma, se muestran diferencias consistentes entre genotipos y su capacidad para recuperarse de tales condiciones, que les permitieron alcanzar una importante acumulación de biomasa aérea y mejorar el rendimiento, a pesar del efecto adverso inicial en algunos tratamientos. ¶

Con formato: Espacio Antes: 0 pto, Después: 0 pto, No agregar espacio entre párrafos del mismo estilo

Eliminado: ¶

Eliminado: un comportamiento similar al registrado para la interacción suplencia de agua-genotipos, donde

Eliminado: un

Con formato: Subíndice

Con formato: Subíndice

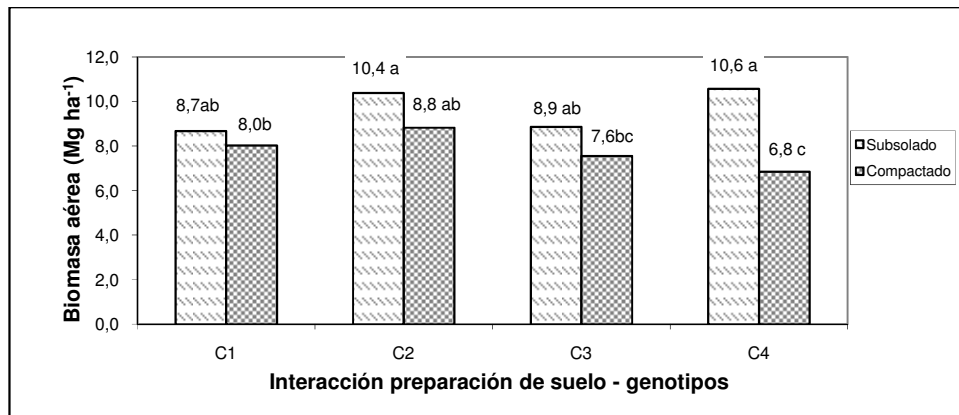


Figura 44. Valores promedio de la biomasa aérea a los 98 dds., para la interacción de los tratamientos de preparación de suelo-genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.5. Peso seco de raíces

4.3.5.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

Con relación al peso seco de raíces en plantas jóvenes, el análisis de varianza, no indicó diferencias significativas para los tratamientos de suplencia de agua, alcanzando valores similares entre 2,37 y 2,63 g planta⁻¹ (Figura 45). Este resultado podría justificarse, por el poco tiempo con relación al inicio del estrés hídrico (10 días), cuando las plantas están en proceso de manifestar los ajustes fisiológicos en las plantas (Ludlow, 1987).

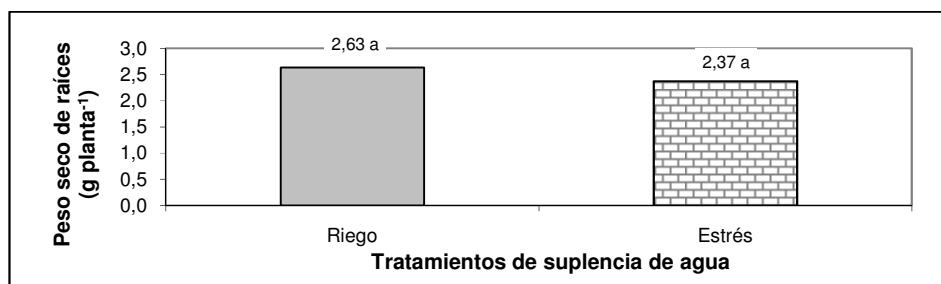


Figura 45. Valores promedio de peso seco de raíces, para los tratamientos de suplencia de agua en plantas jóvenes (45 dds). Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Con formato: Espacio Después: 0 pto

Eliminado: ¶

Eliminado: E

Eliminado: en cuanto al peso seco de raíces en plantas jóvenes (Figura 42),

Eliminado: alrededor

Eliminado: d

Eliminado: 4

Eliminado: se

Eliminado: relativo

Eliminado: donde

Eliminado: percibir el efecto y

Eliminado: 42

Por otra parte, en esta etapa de crecimiento el tejido celular en las raíces esta en proceso de maduración y el agua utilizada para el crecimiento celular requiere vencer potenciales de agua diferentes a los del suelo, además de la liberación y transporte de reguladores del crecimiento, todo lo cual retrasa la respuesta a factores como el déficit hídrico (Boyer y Silk, 2004).

En plantas adultas (98 dds), tampoco se manifestó de manera significativa alguna diferencia (Figura 46). Aunque las medias parecen diferentes, el coeficiente de variación registrado estuvo por encima del 50% (Anexo 8.1.p), lo que impidió establecer diferencias en la variable.

Eliminado: 43

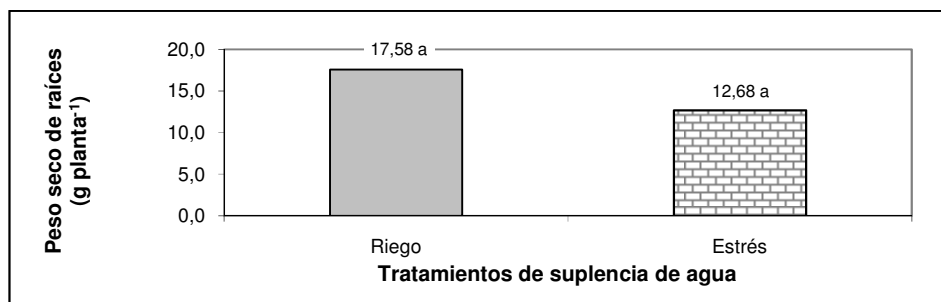


Figura 46. Valores promedio de peso seco de raíces, para los tratamientos de suplencia de agua en plantas adultas (98 dds). Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 43

Tales resultados se contraponen a los analizados para la biomasa aérea, donde se evidenciaron diferencias en los tratamientos de humedad. Esto se puede explicar por las características genotípicas ya señaladas, donde C₂ tiene baja cantidad natural de raíces y poco superficiales, como adaptación para la tolerancia a las condiciones de estrés (Bolaños y Edmeades 1993a), mientras C₃ y C₄ son de mayor volumen de raíces, y aunque mostraron mayor sensibilidad inicial al estrés hídrico, demostraron alta capacidad de recuperación después de terminar el período de estrés, ya que se ha reportado un crecimiento rápido y exponencial en plantas de maíz en la etapa reproductiva que llega hasta los 80 dds., (Mengel y Barber, 1974, citados por Amos y Walters, 2006).

Eliminado: a diferencia

Eliminado: por ser de alto rendimiento

Eliminado: fuer

Eliminado: ás

Eliminado: les inicialmente

Eliminado: aunque

Eliminado: durante el ciclo, lo cual podría esperarse

Eliminado: al

Por otra parte, es evidente que aunque los cambios en el peso seco de raíces no evidenciaron diferencias en plantas adultas, el efecto inicial en el desarrollo de la planta bajo condiciones adversas como el estrés hídrico, pudo haber afectado el desarrollo temprano de los genotipos, lo que se manifestó en las diferencias observadas en la biomasa aérea.

4.3.5.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

En los tratamientos de preparación del suelo se observaron diferencias altamente significativas en plantas jóvenes (Figura 47), resaltando un efecto adverso al crecimiento de las raíces bajo condiciones de compactación, en cuyo tratamiento el peso seco se redujo en más de 40%, con relación al tratamiento subsolado.

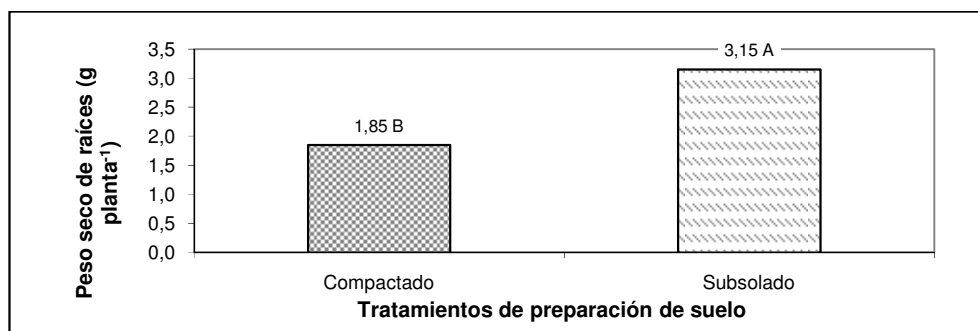


Figura 47. Valores promedio del peso seco de raíces, para el tratamiento de preparación del suelo en plantas jóvenes (45 dds). Letras distintas muestran diferencias altamente significativas ($\alpha = 1\%$).

Estos valores del peso seco alcanzados en plantas jóvenes bajo el tratamiento con subsolado (Figura 47), son comparables a los reportados por Tubeileh *et al.* (2003), con promedio de 3.90 g pl⁻¹ en la peso seco de raíces de plantas jóvenes de maíz (42 dds), en un suelo con densidad aparente de 1.45 g cm⁻³. Según estos autores, la compactación de suelo en plantas de maíz impide la elongación de las raíces y reduce su biomasa, al disminuir la tasa de asimilación de carbono. Además, al analizar la partición de carbono en la planta, estos autores encontraron un aumento en el carbono microbiano del suelo, atribuyendo este hecho a un gasto realizado por la raíz para mejorar las condiciones de crecimiento y la penetración en zonas compactadas.

Eliminado: De igual forma, e

Eliminado: 44

Con formato: Espacio Después: 6 pto

Con formato: Espacio Después: 18 pto, Agregar espacio entre párrafos del mismo estilo

Eliminado: 44

Eliminado: .

Eliminado: ¶

Eliminado: 52

Eliminado: ,

La reducción en la acumulación de materia seca de raíces en esta etapa, reflejó una alta sensibilidad de la raíz de los genotipos a la compactación, lo que concuerda con los resultados de Díaz-Zorita *et al.* (2005), quienes indicaron que la elongación radicular en maíz, fue más sensible a propiedades físicas del suelo como la macroporosidad y el aire disponible, bajo condiciones de compactación. Clark *et al.* (2003), han indicado que las raíces responden ante condiciones de compactación, a través de mecanismos como el redireccionamiento o el doblaje, lo que parece estar ligado a la producción de etileno, con el consecuente gasto energético para la planta.

Eliminado: ,
 Eliminado: ,
 Eliminado: radical
 Eliminado: , a propiedades físicas del suelo como la macroporosidad y el aire disponible

En plantas adultas, no se observaron estas diferencias (Figura 48), indicando una recuperación del sistema radicular de las plantas afectadas, durante el ciclo de cultivo. Este hecho, no reduce el efecto fisiológico inicial en las plantas, especialmente en una etapa altamente sensible para el desarrollo de la planta y del rendimiento como es la floración (Blum, 1988; Amos y Walters, 2006), el cual no fue estudiado en este experimento y son de carácter muy complejo (Ludlow, 1987). Además en esta investigación, no se pudo caracterizar el sistema radicular en cuanto a la forma, distribución y densidad, características que pudieron evidenciar diferencias en plantas adultas (Gardner *et al.*, 1999; Amato y Ritchie, 2002).

Eliminado: 45
 Eliminado: contrarresta

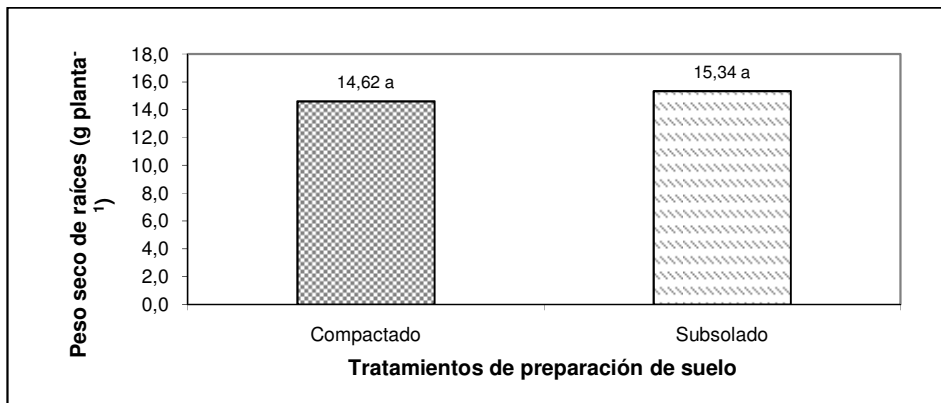


Figura 48. Valores promedio del peso seco de raíces para los tratamientos de preparación del suelo en plantas adultas (98 dds). Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 45
 Con formato: Espacio Después: 18 pto, Agregar espacio entre párrafos del mismo estilo

4.3.5.3. Efecto de los tratamientos de genotipos

La comparación entre genotipos para las plantas jóvenes, no indicó diferencias en el peso seco de las raíces (Figura 49), lo que demostró cierta similitud en cuanto al desarrollo radicular para esta etapa. Cabe destacar asimismo, que los genotipos C₂ y C₃, mostraron el menor desarrollo, lo que evidencia un importante efecto negativo de la compactación en C₃, dada su altabiomasa radicular en mejores condiciones de suelo. Sin embargo, estos valores podrían considerarse bajos al compararlos con reportes que han alcanzado valores de 12 g pl⁻¹, según lo indican Amos y Walters (2006).

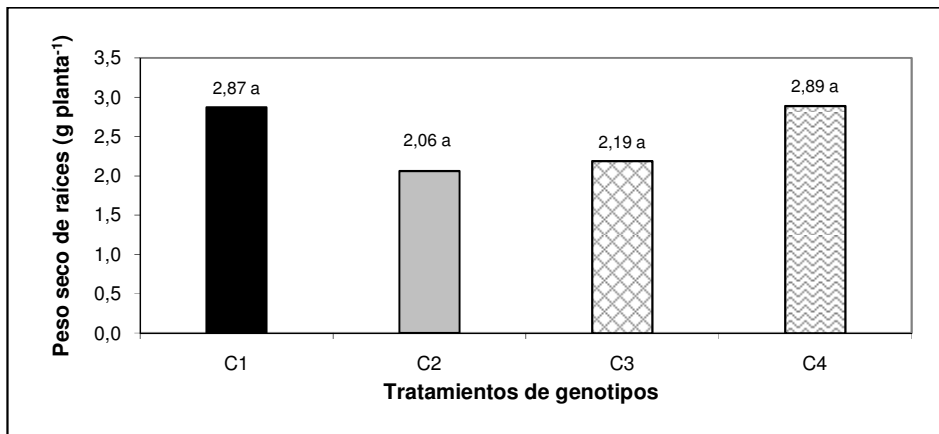


Figura 49. Valores promedio del peso seco de raíces, para los tratamientos de genotipos en plantas jóvenes (45 dds). Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Este comportamiento se mantuvo en las plantas adultas (Figura 48), con una distribución en cuanto al peso muy similar a la registrada en plantas jóvenes, siendo los genotipos C₂ y C₃, los que arrojaron el promedio más bajo, aunque no suficientes para ser significativas estadísticamente con relación a C₁ y C₄.

Cabe destacar, que la evaluación visual de la arquitectura de la planta muestra el predominio de raíces laterales bajo la condición de compactación como lo destaca la figura 51, con el genotipo C₃. Este tipo de desarrollo, podría relacionarse con ajustes fisiológicos en algunos genotipos, para contrarrestar el efecto de la compactación en el sistema radicular.

Eliminado: 1

Eliminado: preparación de suelo

Eliminado: 46

Con formato: Superíndice

Eliminado: 46

Eliminado: 47

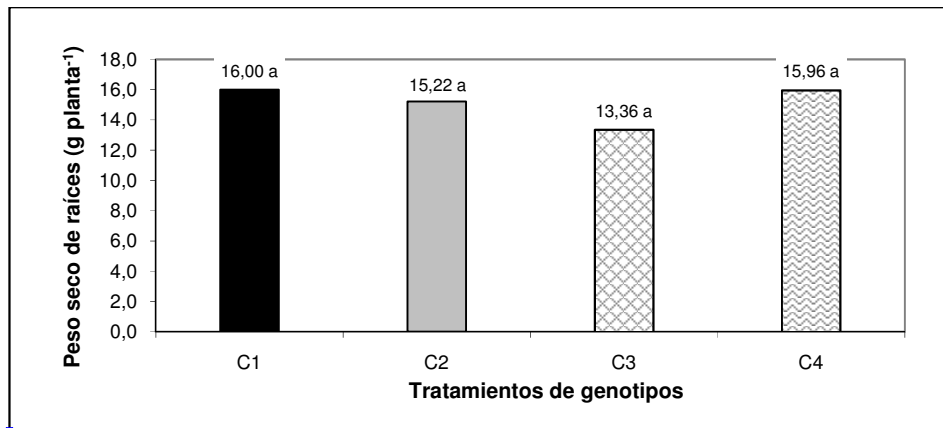


Figura 50. Valores promedio de peso seco de raíces, para los tratamientos de genotipos en plantas adultas (98 dds). Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 1

Con formato: Espacio Después: 0 pto

Eliminado: 47

Con formato: Espacio Antes: 3 pto

Esta morfología, se ajusta a lo reportado por Núñez y Cabrera (2002) quienes encontraron que la compactación de suelo, indujo una mayor exploración horizontal en plantas de maíz, lo cual estuvo relacionado con un aumento en la eficiencia del transporte de oxígeno al eje lateral de las raíces,



Eliminado: Cabe destacar, que la evaluación visual de la arquitectura de la planta muestra el predominio de raíces laterales bajo la condición de compactación como lo destaca, la figura 48, con el genotipo C₃. Este tipo de desarrollo, podría relacionarse con ajustes fisiológicos en algunos genotipos, para contrarrestar el efecto de la compactación en el sistema radicular.¶

propiciando una mayor proliferación de raíces en este eje. En trigo, Atwell

Figura 51. Detalle de raíces del genotipo C₃ con crecimiento horizontal bajo el tratamiento de compactación

Eliminado: 48

(1989a), encontró que plantas a los 47 dds., creciendo en un suelo compactado mostraron raíces cortas, gruesas y deformes, con crecimiento lento e ineficiente exploración del suelo. En un estudio paralelo a este (Atwell, 1989b), se indica que la concentración de azúcar soluble fue mayor en raíces bajo condiciones de suelo compactado, lo cual fue atribuido a la baja tasa de crecimiento en estas condiciones.

La diferencia inicial señalada en los tratamientos de preparación de suelo, no se mantuvo en el tiempo, lo cual permite asumir que los genotipos se recuperaron del impacto negativo

inicial generado por la compactación. Por otra parte, los resultados en plantas adultas fueron más variables, indicando diferente grado de recuperación, aunque los cambios no arrojaron diferencias significativas entre los tratamientos. Esto, podría explicarse debido a una compensación del peso seco, derivada de mecanismos tales como el ya discutido de la exploración lateral de las raíces, debido al confinamiento a la capa superficial del suelo, y reportado por Núñez y Cabrera (2002) o la configuración natural de poco desarrollo radicular en genotipos como C₁ y C₂ (Bolaños y Edmeades, 1993b). Además, como lo señalaron Amos y Walters (2006), después de la anthesis pudo haberse acelerado el desarrollo radical, en tal medida que llevó a la recuperación de la masa radical de genotipos como C₄, contribuyendo a reducir las diferencias entre ellos.

Resalta también en estos resultados, que los cambios en el peso seco de las raíces fueron menos marcados a los señalados para la biomasa aérea en plantas adultas, sugiriendo un menor efecto general en las raíces, motivado a la recuperación de las raíces ya señalada, una vez finalizado el período de estrés hídrico. Resultados publicados por Grzesiak (2009), se contraponen a los conseguidos en la presente investigación, ya que la biomasa radical fue más afectada por la compactación que la aérea; no obstante, es necesario considerar que en la presente investigación se incluyeron genotipos tolerantes (C₁ y C₂), con un sistema radicular más escaso, en relación a los genotipos comerciales (C₃ y C₄), lo que pudo reducir el impacto de tales condiciones.

Al relacionar estas variables con la reducción del área foliar observada y la importancia de su efecto en el desarrollo de la planta, se podría señalar que el peso seco en raíces, es una variable poco robusta para observar variaciones pequeñas en este órgano, que podrían significar ajustes importantes para la planta y su comportamiento ante el estrés hídrico o la compactación de suelo, tales como la redistribución en el suelo (Unger y Kaspar, 1994) o cambios en su anatomía (Clark *et al.*, 2003).

Asimismo, cambios en la morfología como la deformación en el crecimiento del ápice, el engrosamiento de las raíces (Atwell, 1993) ó el redireccionamiento y doblaje (Clark *et al.*, 2003) que se evidenciaron visualmente en el campo, no pudieron reflejarse en este tipo de variable, siendo tales características de gran importancia para el desarrollo de la planta, ya que afectan la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes, además de generar un gasto

energético importante en la planta (Tardieu, 1994; Clark *et al.*, 2003). Otras variables como el aumento en la resistencia del flujo de agua suelo-raíz por efecto de la compactación, podrían reflejarse aún bajo condiciones de adecuada suplencia de agua (Tardieu, 1994).

4.3.6. Partición de biomasa aérea

4.3.6.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

El análisis estadístico para la partición de biomasa en los tratamientos de suplencia de agua, no indicó diferencias entre las medias (Cuadro 18). Aunque hubo diferencias en el peso seco de los órganos para cada tratamietno, el porcentaje relativo dentro de los mismos fue muy similar, indicando que la redistribución de asimilados fue similar para ambos tratamientos.

Cuadro 18. Peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para los tratamientos de suplencia de agua.

Tratamiento	Peso seco de órganos de la planta (g planta ⁻¹)				
	Tallo	Hojas	Brácteas	Grano	Tusa
Riego	52,42±1,86 24,20 % a	22,39±0,85 10,33 % a	22,05±1,28 10,18 % a	98,52±3,61 45,48 % a	21,23±0,70 9,80 % a
Estrés	38,23±2,40 22,25 %a	20,88±1,18 12,15 % a	15,48±0,93 9,01 %a	79,40±3,53 46,22 %b	17,80±0,98 10,36 %a

Letras distintas por columna muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Como es evidente, el grano es el órgano con mayor peso, alcanzando un valor relativo alrededor de 45% del total de la biomasa aérea, aunque presentó la mayor desviación estándar. Le siguió en importancia el tallo con valores de 22%, mientras que las hojas, las brácteas y la tusa arrojan valores cercanos al 10%. Esta proporción se mantuvo tanto en ambostratamientos de suplencia de agua, manteniéndose cierta relación compensatoria entre los cambios de la proporción de grano, con los valores en el peso del tallo. Esto contrasta con los resultados de Bolaños *et al.* (1993c), quienes indicaron que las mejoras en la tolerancia a sequía en genotipos como el Tuxpeño (C₂), se relacionaron con un aumento en la partición de la biomasa hacia el grano, lo que no pudo evidenciarse en este caso.

Con formato: Espacio Después: 6 pto

Eliminado: identico

Eliminado: Valores promedio del p

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Espacio Antes: 0 pto, Después: 6 pto, Posición: Horizontal: 0,32 cm, Con relación a: Margen

Tabla con formato

Eliminado: Letras distintas por columna muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Con formato: Fuente: 10 pto, Sin Cursiva

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Fuente: Sin Cursiva

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0,5 cm, Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0,5 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0,5 cm, Espacio Antes: 0 pto

Eliminado: distribución

Eliminado: los

Eliminado: señalados

Eliminado: con pocas variaciones entre ellos,

4.3.6.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

Los resultados de esta variable en los tratamientos de preparación de suelo (Cuadro 19) mostraron un comportamiento similar a los de suplencia de agua, no indicando diferencias estadísticas. La mayor variación observada en el peso seco del grano, contribuyó al aumento de la variabilidad total, mientras que la proporción relativa del peso respecto a los órganos se mantuvo estable.

Cuadro 19. Peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para los tratamientos de preparación de suelo.

Tratamiento	Peso seco de órganos de la planta (g planta ⁻¹)				
	Tallo	Hojas	Brácteas	Grano	Tusa
Compactado	43,65±2,13 23,42 % a	20,85±1,08 11,19 % a	18,98±1,15 10,18 % a	82,46±4,05 44,25 % a	20,41±0,94 10,95 % a
Subsolado	47,00±2,14 23,26 % a	22,41±0,94 11,09 % a	18,54±1,06 9,18 % a	95,46±3,09 47,25 % a	18,62±0,74 9,22 % a

Letras distintas por columna muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

4.3.6.3. Efecto de los tratamientos de genotipos

El análisis para los tratamientos de genotipos, tampoco indicaron diferencias en la partición de la biomasa aérea, (Cuadro 20). Las variaciones observadas, fueron propias de las diferencias encontradas en la biomasa aérea, las cuales pueden ser derivadas del fenotipo de los materiales evaluados. En términos generales, destaca el peso seco del grano en el genotipo C₂, el cual fué semejante al presentado por el genotipo C₄, reflejando la similitud alcanzada en la biomasa aérea para estos genotipos. No obstante, cabe destacar las observaciones de Yi *et al.* (2010), quienes resaltaron la importancia de la redistribución de asimilados según cada etapa de crecimiento, mientras Bolaños *et al.* (1993), indicaron las mejoras en la partición de biomasa en etapa de floración hacia la inflorescencia femenina, en la selección de genotipos tolerantes a estrés hídrico como el genotipo C₂.

Eliminado: para
Con formato: Espacio Después: 12 pto

Eliminado: ¶
Con formato: Espacio Antes: 0 pto
Con formato: Fuente: 10 pto
Eliminado: Valores promedio del p
Eliminado: Letras distintas por columna muestran diferencias significativas ($\alpha=5\%$).

Con formato: Fuente: 10 pto, Sin Cursiva

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Fuente: Sin Cursiva

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Espacio Antes: 3 pto, Después: 18 pto

Eliminado: ,

Eliminado: ,

Eliminado: ron

Con formato: Subíndice

Con formato: Subíndice

Con formato: Fuente: Cursiva

Con formato: Fuente: Cursiva

Con formato: Subíndice

Cuadro 20. Peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para los tratamientos de genotipos. Letras distintas por columna muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Tratamiento	Peso seco de órganos de la planta (g planta ⁻¹)				
	Tallo	Hojas	Brácteas	Grano	Tusa
C1	41,8±6,02 23,9 % a	21,2±2,10 12,3 % a	16,8±5,62 9,4 % a	76,4±18,15 43,3 % a	19,2±2,11 11,1 % a
C2	45,4±5,79 22,4 % a	20,4±0,73 10,3 % a	22,6±2,16 11,5 % a	91,8±16,87 45,2 % a	21,5±1,27 10,6 % a
C3	38,3±6,89 21,9 % a	17,5±4,56 10,2 % a	16,7±5,06 9,6 % a	83,0±19,87 48,5 % a	17,0±2,35 9,9 % a
C4	55,7±4,31 24,6 % a	27,5±0,84 12,2 % a	18,9±2,60 8,3 % a	104,6±11,82 45,9 % a	20,5±4,25 9,1 % a

Letras distintas por columna muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

4.3.6.4. Interacciones entre tratamientos

La comparación de medias para la partición de biomasa aérea, para la interacción de los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo, no indicó diferencias significativas (Cuadro 21). Los resultados indican una proporción relativa similar para los tratamientos, destacando una mayor variación en el peso seco del grano.

Cuadro 21. Peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para la interacción de los tratamientos de suplencia de agua –preparación de suelo.

Tratamiento		Peso seco de órganos de la planta (g planta ⁻¹)				
		Tallo	Hojas	Brácteas	Grano	Tusa
Riego	Subsolado	57,2 ± 1,95 24,1 % a	23,7 ± 0,78 10,0 % a	23,0 ± 1,36 9,7 % a	110,0 ± 2,27 47,0 % a	21,5 ± 0,52 9,2 % a
	Compactado	47,7 ± 1,77 24,7 % a	21,0 ± 0,92 10,6 % a	21,1 ± 1,21 10,9 % a	87,0 ± 4,96 43,0 % a	21,0 ± 0,88 10,8 % a
Estrés	Subsolado	36,8 ± 2,31 21,8 % a	21,1 ± 1,11 12,6 % a	14,1 ± 0,77 8,3 % a	80,9 ± 3,91 48,0 % a	15,8 ± 0,96 9,4 % a
	Compactado	39,6 ± 2,50 22,3 % a	20,7 ± 1,25 11,7 % a	16,8 ± 1,09 9,8 % a	78,0 ± 3,14 44,8 % a	19,8 ± 1,01 11,4 % a

Letras distintas por columna muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Con formato: Fuente: 10 pto

Eliminado: Valores promedio del p

Con formato: Espacio Después: 0 pto, Posición: Horizontal: 0,32 cm, Con relación a: Margen

Tabla con formato

Con formato: Fuente: 10 pto, Sin Cursiva

Con formato: Fuente: Sin Cursiva

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Espacio Antes: 0 pto, Después: 18 pto

Eliminado: ¶

Con formato: Espacio Después: 18 pto

Eliminado: expresada en peso seco

Eliminado: Al respecto, Blum *et al.*, (1994) (citado por Blum, 1996) han indicado que existen casos donde el uso de las reservas en la planta, en especial para el llenado de grano, es una característica constitutiva independiente de las condiciones ambientales, por lo que no sería fácil evidenciarlo en condiciones como el estrés aplicado o la presencia de limitantes mecánicas.

Eliminado: Cuadro 21. Valores promedio del peso seco de l (... [5]

Con formato (... [6]

Tabla con formato

Tabla con formato

Con formato (... [7]

Con formato: Fuente: Sin Cursiva

Eliminado: Riego-

Con formato: Centrado

Eliminado: Riego-

Eliminado: Estrés-

Con formato: Centrado

Eliminado: Estrés-

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Espacio Antes: 0 pto

Al respecto, Blum *et al.* (1994) (citado en Blum, 1996) han indicado que existen casos donde el uso de las reservas en la planta, en especial para el llenado de grano, es una característica constitutiva independiente de las condiciones ambientales, por lo que no sería fácil evidenciarlo en condiciones como el estrés aplicado o la presencia de limitantes como la compactación.

Por otra parte, Atwell (1993) ha indicado que aunque el metabolismo de los carbohidratos cambia por efecto de la compactación de suelo, tanto en la parte aérea como en las raíces, redireccionando los compuestos hacia los tejidos de crecimiento, la coordinación de tales cambios en la anatomía y el metabolismo, aún permanece en el misterio.

4.3.7. Índice de Cosecha (IC)

4.3.7.1. Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

Los resultados del IC, no mostraron diferencias estadísticas para los tratamientos de suplencia de agua (Figuras 52), alcanzando valores superiores a 0,45, el cual se considera adecuado para los genotipos de maíz (Bänziger, *et al.*, 2000). Esto sugiere que las diferencias observadas tanto en el rendimiento como en la biomasa aérea para el tratamiento de suplencia de agua, se compensaron entre los órganos de la planta, sin afectar directamente la proporción de grano en la misma. Aún así, como lo demostró el análisis de partición de la biomasa aérea, no están claros tanto los cambios, como sus efectos en el rendimiento, especialmente los cambios metabólicos que afectan el flujo de los azúcares hacia los órganos reproductivos (Boyer y Westgate, 2004).

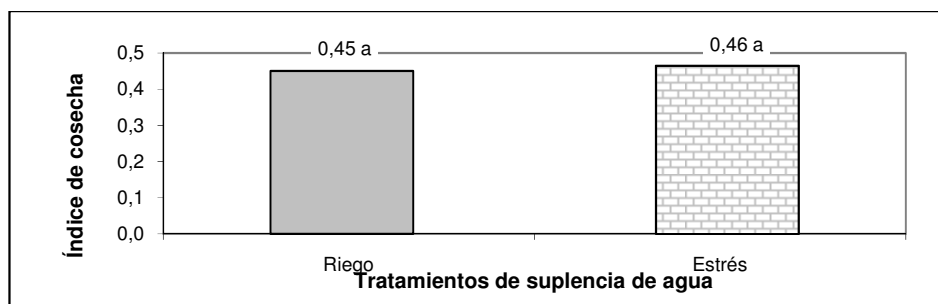


Figura 52. Valores promedio del IC, para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

- Eliminado: El
- Con formato: Sin Resaltar
- Eliminado: fue similar
- Con formato: Sin Resaltar
- Con formato: Sin Resaltar
- Eliminado: y preparación de suelo
- Eliminado: 49
- Eliminado: y 50
- Eliminado: con
- Eliminado: que se
- Eliminado: ,

Eliminado: 49

4.3.7.2. Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

Los tratamientos de preparación del suelo, tampoco indicaron diferencias para la variable IC, con promedios similares en ambos tratamientos (Figura 53). Estos resultados, pueden relacionarse con la capacidad compensatoria de los genotipos manifestada tanto en la biomasa aérea, como en el peso seco de raíces, lo que contribuyó a mantener un IC similar para ambos tratamientos. Esta compensación, estaría vinculada al vigor inicial de cada genotipo, la capacidad de reajuste fisiológico y la eficiencia en el uso del agua, entre otras características (Atwell, 1989b; Amos y Walters, 2006; Yi *et al.*, 2010).

Eliminado: de suplencia de agua

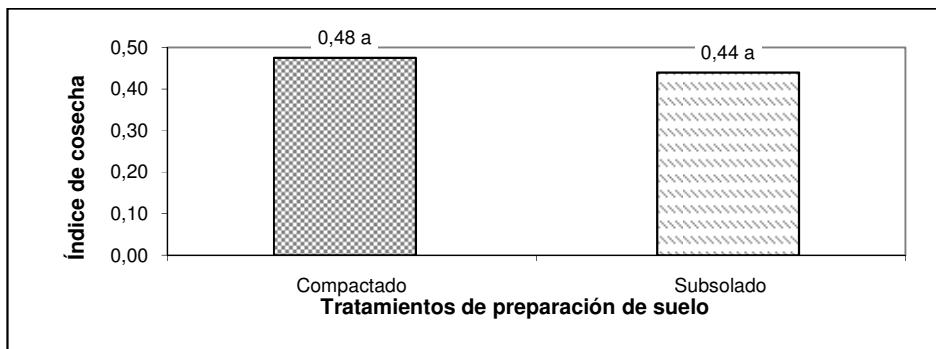


Figura 53. Valores promedio del IC, para la los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 50

4.3.7.3. Efecto de los tratamientos de genotipos

Asimismo, las medias para el tratamiento de genotipos (Figura 54), no se diferenciaron estadísticamente con relación al IC, lo cual sugiere que aunque existe una marcada diferencia en la genética de los genotipos estudiados, la partición de asimilados entre el grano y el resto de la biomasa de la planta, fue relaizada en una proporción equivalente, compensando con ello la diferencia observada con relación a la biomasa aérea. Este comportamiento, ha sido señalado en estudios de mejoramiento por Bolaños y Edmeades (1993), en genotipos tolerantes a sequía como C₂, donde el aumento del rendimiento obtenido, ha sido asociado a los ajustes en este índice.

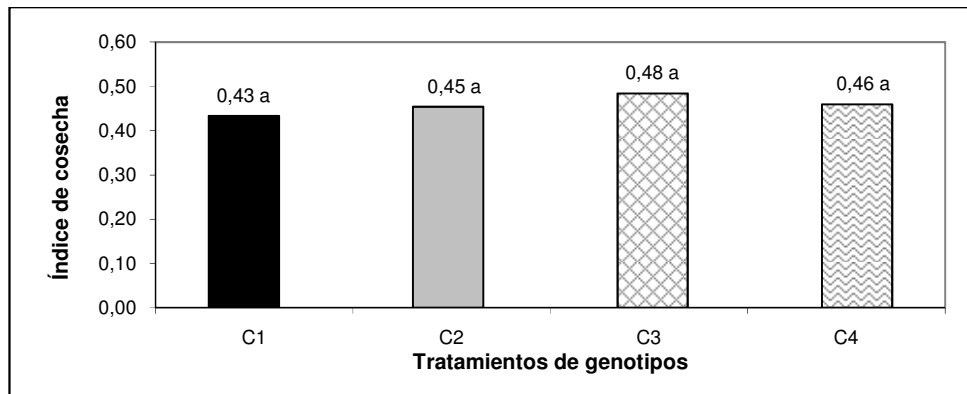


Figura 54. Valores promedio del IC, para los tratamientos de genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 51

4.3.7.4. Interacciones entre tratamientos

El análisis de la interacción de los tratamientos de genotipo con los de suplencia de agua para este índice, evidenciaron diferencias altamente significativas (Figura 55). El genotipo C₃ alcanzó el máximo valor de IC, con un promedio de 0,54, bajo condiciones de riego. Conviene indicar, que los valores mostrados de IC por todos los genotipos bajo el tratamiento de estrés, fueron similares oscilando entre 0,43 y 0,48, indicando una alta capacidad compensatoria de los mismos para este índice.

Resalta además, que los valores obtenidos para el tratamiento de estrés en todos los genotipos, están muy por encima de los obtenidos por investigadores como Earl y Davis (2003), quienes mostraron valores inferiores a 0,2 para este índice, los cuales estuvieron directamente relacionados en su estudio, con la reducción en el rendimiento. No obstante, Bolaños y Edmeades (1993) han señalado que los cambios en este índice no son constantes a cualquier nivel de producción de biomasa, encontrándose variaciones importantes entre los genotipos aún bajo condiciones de adecuada suplencia de agua.

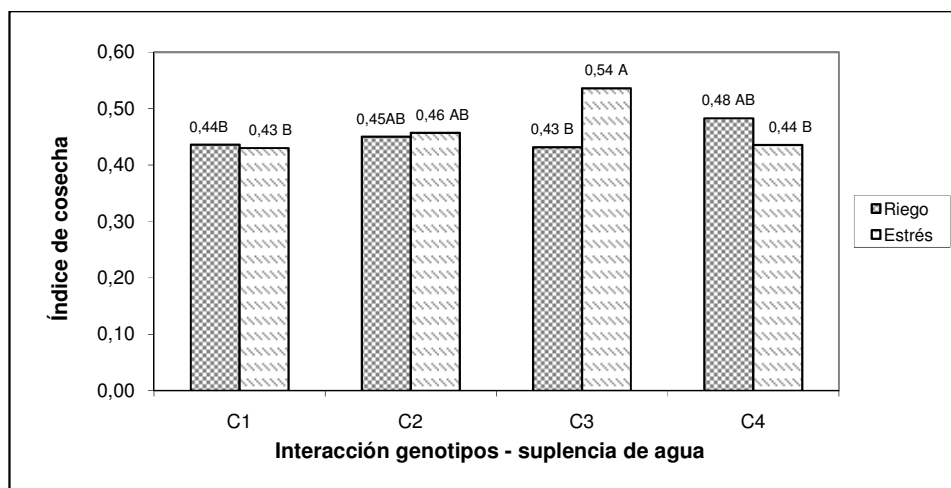


Figura 55. Valores promedio de IC, para la interacción de tratamientos de genotipos - suplencia de agua. Letras distintas muestran diferencias altamente significativas ($\alpha = 1\%$).

Eliminado: 52

Por otra parte, el valor más bajo en esta investigación, es similar a los obtenidos por Bolaños *et al.* (1993a), para genotipos de Tuxpeño (C₂), bajo condiciones de adecuada suplencia de agua, lo que acentúa el efecto negativo producido por la compactación en dicho genotipo. Cabe destacar, que se ha señalado la pérdida de raíces superficiales en C₂ con el proceso de selección (Bolaños *et al.*, 1993), lo que podría ser una desventaja para la adecuada exploración del suelo por este genotipo bajo condiciones de compactación, ya que la profundidad efectiva estaría limitando el adecuado crecimiento de raíces.

4.3.8. Características biométricas

4.3.8.1. Altura de planta

a) Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

El análisis de varianza para esta variable indicó que el tratamiento de suplencia de agua, no generó diferencias significativas sobre la altura de las plantas (Figura 56), observándose plantas con promedios similares, evidenciando así, que esta característica no contribuyó de manera importante en las diferencias observadas en la acumulación de biomasa para este tratamiento.

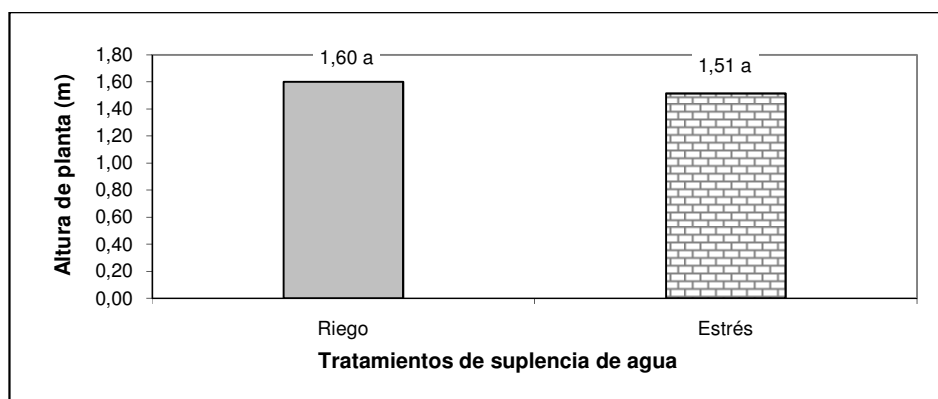


Figura 56. Valores promedio de altura de planta, para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 53

Al respecto, es necesario considerar que los genotipos estudiados presentan diferencias genéticas en cuanto al tamaño de las plantas, donde C_2 y C_1 tienden a ser de porte más bajos con relación a C_3 y C_4 , en los cuales se esperaría una mayor demanda hídrica. En este sentido, Blum (1996) ha indicado que aunque bajo condiciones de estrés hídrico ha de esperarse una mayor reducción del crecimiento en genotipos de mayor demanda hídrica, esta reducción no deja de ser significativa en genotipos de porte bajo.

b) Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

De igual manera, en el tratamiento de preparación de suelo no se observaron diferencias significativas (Figura 57), mostrando valores promedios similares a los alcanzados bajo el tratamiento de suplencia de agua. Tales resultados, indican que esta variable no manifestó diferencias fenotípicas ante los tratamientos evaluados, más allá de las variaciones genotípicas propias, por lo que se pueden considerar que se comportó como una característica estable tanto a la suplencia de agua, como a la condición de preparación de suelo.

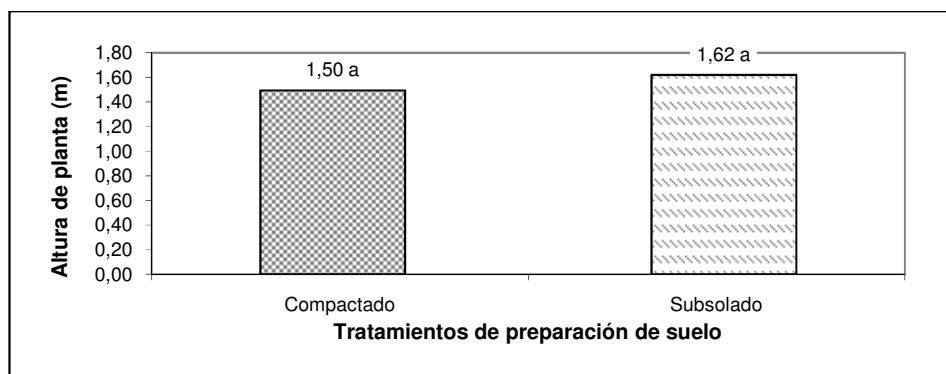


Figura 57. Valores promedio de altura de planta, para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 54

c) Efecto de los tratamientos de genotipos

Entre los genotipos evaluados, hubo diferencias marcadas en la altura de planta (Figura 58), siendo C_4 el de mayor tamaño y C_2 el más bajo. Estas diferencias derivadas de la genética de cada genotipo forman parte de las características individuales que le confieren en el caso de los más pequeños, ventajas adicionales sobre la estabilidad de la planta al volcamiento por efecto del viento. En tal sentido, Riccelli (2000) ha subrayado el avance obtenido por los mejoradores en la reducción del tamaño de la planta y la configuración del follaje, en poblaciones como el genotipo Tuxpeño (C_2), donde tal característica no sacrifica en alta proporción la producción de grano. Asimismo, en genotipos tolerantes al estrés como C_2 , la baja altura puede estar directamente asociada con la reducción de los días para floración, tendencia mostrada como mecanismo de escape en condiciones de estrés hídrico (Bolaños y Edmeades, 1993b).

Para Bänziger *et al.* (2000), el estrés de humedad produce un aumento en el consumo de energía y nutrientes que se refleja en el desarrollo de la planta, pudiendo traducirse en características como la reducción de la altura; no obstante, dependiendo de la tolerancia y la capacidad de recuperación del genotipo, puede reflejarse de forma poco evidente, como sucedió en este experimento para C_3 , con la biomasa aérea.

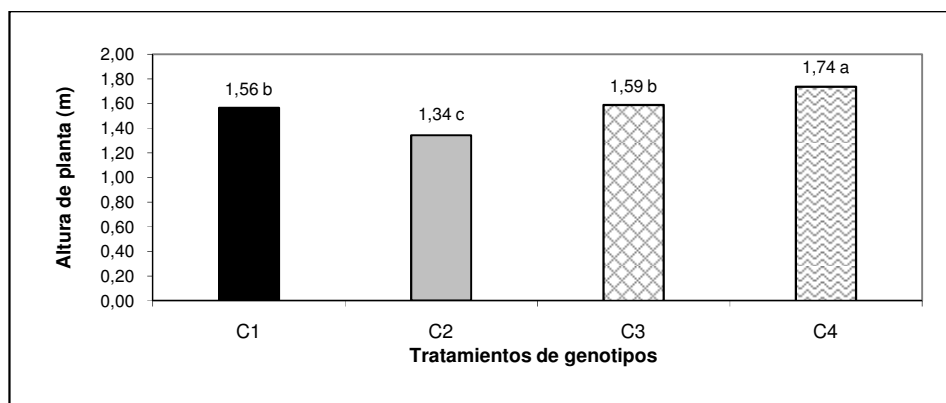


Figura N° 58. Valores promedio de altura de planta, para los tratamientos de genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 55

4.3.8.2. Altura de mazorca

a) Efecto de los tratamientos de suplencia de agua

El análisis de la varianza para los tratamientos de suplencia de agua, indica diferencias significativas sobre la altura de la mazorca (Figura 59), reduciéndose la misma bajo condiciones de estrés. Este resultado, indica que las plantas pudieron haber retrasado el desarrollo de los puntos de crecimiento precursores de la mazorca por efecto del estrés hídrico, ya que al no haber reducción en la altura de la planta, pudo verse afectado el metabolismo para la emisión de la mazorca en nudos inferiores. No obstante, Espinoza-Paz (1996) obtuvo una reducción de la longitud y diámetro de los entrenudos situados debajo de la mazorca bajo condiciones de déficit hídrico, atribuyendo este efecto a la inhibición en el alargamiento celular.

Eliminado: 56

En este sentido, San Vicente *et al.* (1999), trabajando con líneas tropicales de maíz, encontraron una correlación entre el rendimiento y la altura de mazorca de 38%, indicando que bajo condiciones de sequía hubo una reducción de 11 cm en este parámetro. Asimismo, Ritchie *et al.* (1992), resaltan el posible efecto de la falta de humedad y nutrientes en la etapa de desarrollo vegetativo, sobre el potencial de la planta, produciendo alteraciones o retraso en las subsiguientes etapas.

Eliminado: ,

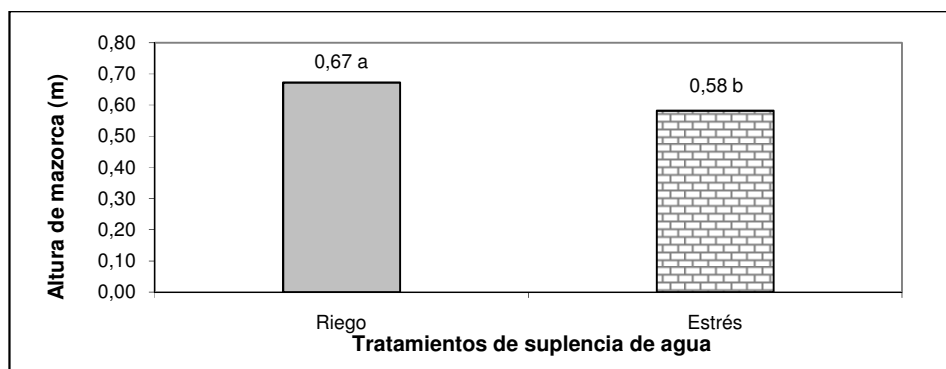


Figura 59. Valores promedio de altura de mazorca, para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 56

b) Efecto de los tratamientos de preparación de suelo

La altura de mazorca no se mostró afectada por los tratamientos de preparación de suelo, generando valores similares en esta variable (Figura 60), lo que indica que el subsolado no afectó el desarrollo de los entrenudos y los genotipos solo expresaron sus diferencias genotípicas.

c) Efecto de los tratamientos de genotipos

En los tratamientos de genotipo, las diferencias observadas, se corresponden con las mostradas en la variable altura de la planta (Figura 61), donde C_4 alcanzó asimismo la mayor altura de mazorca, seguido por C_1 y C_3 con valores intermedios y C_2 el de menor valor. Es importante destacar el caso de C_2 , cuya evolución genética lo caracteriza de porte bajo (Bolaños y Edmeades, 1999c), no mostró diferencias importantes con C_1 , genotipo de mayor tamaño, comparable a C_3 en cuanto a altura de planta. Resalta asimismo, que todos los genotipos tuvieron una altura de mazorca por debajo de la mitad de la planta, lo cual reduciría el acame en siembras comerciales (García *et al.*, 2009).

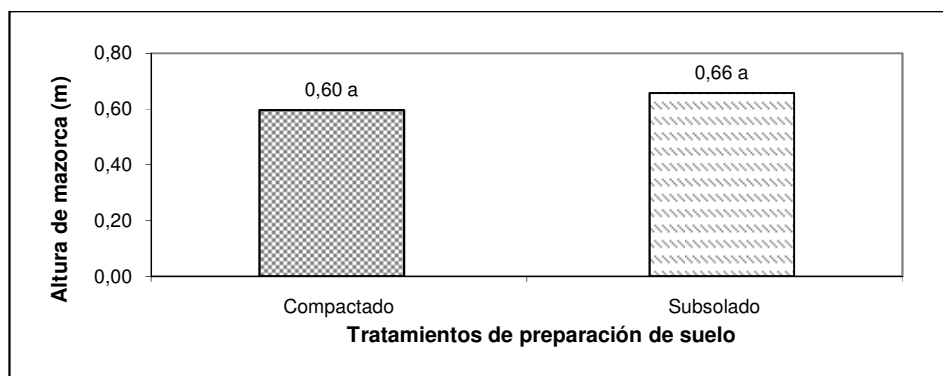


Figura 60. Altura de mazorca, para los tratamientos de preparación de suelo. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 57

Eliminado: Valores promedio de a

Aunque este resultado es consistente con lo señalado por Espinoza-Paz (1996), en genotipos como C₁, C₂ y C₃, donde se esperaría una menor altura de mazorca por efecto del estrés hídrico, resalta el comportamiento de C₄, el cual a pesar de tener alta demanda hídrica y alto tamaño, no redujo la altura de la mazorca en gran medida. Este hecho sugiere una alta capacidad de recuperación de este genotipo, similar a lo observado en el peso seco de raíces, donde se alcanzó un rápido ajuste una vez suspendida la condición de estrés hídrico. Aunque la expansión celular es reducida, lo que afecta la elongación del tallo (Banziger *et al.*, 2000), la respuesta fisiológica de la planta es muy compleja,

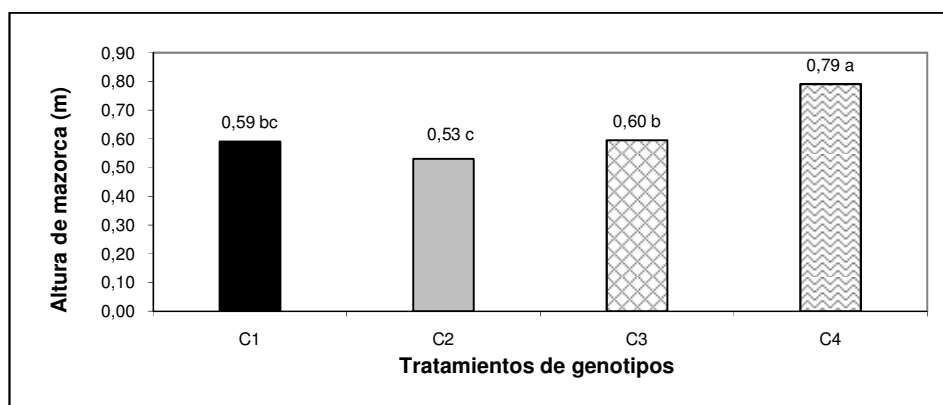


Figura 61. Altura de mazorca, para los tratamientos de genotipos. Letras distintas muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Eliminado: 58

Eliminado: Valores promedio de a

Con formato: Derecha: 0,09 cm, Espacio Después: 0 pto

4.3.9. Concentración de nutrimentos en las hojas

La concentración de nutrimentos en las hojas se muestra en el Cuadro 22, destacando que los niveles de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y manganeso, están por encima de los reportados por Casanova (2000) como óptimos para el cultivo de maíz, mientras cobre y hierro están en el rango óptimo, lo cual sugiere una adecuada nutrición del cultivo, de acuerdo a los registros reportados en Venezuela. Asimismo, Hussaini *et al.* (2008), han reportado menor concentración de nutrimentos en el follaje de maíz a los observados en el presente estudio, aún en parcelas con altos niveles de fertilizantes.

El análisis de los resultados bajo los tratamientos de suplencia de agua, reveló diferencias en el contenido de hierro, donde la condición de estrés produjo una mayor concentración de este elemento en las hojas. Con relación a esta observación, cabe resaltar que este elemento es considerado como parcialmente móvil y de difícil translocación en la planta de maíz (Kannan, 1978), por lo que el valor registrado bajo condiciones de adecuada suplencia de agua al cultivo, indicaría una mejor distribución en toda la planta, producida por un balance más ajustado de los potenciales hídricos dentro de la planta. Sin embargo, dado el amplio rango de concentración reportado hasta ahora para este elemento en maíz, el cual oscila entre 50-250 mg kg⁻¹ (Casanova 2000), las diferencias observadas parecen tener poco peso.

Por otra parte, en los tratamientos de preparación del suelo, el subsolado marcó diferencias únicamente en el caso del calcio, mostrando una mayor concentración del elemento. Este resultado puede relacionarse con el mayor agotamiento de humedad del suelo observado bajo el tratamiento de subsolado, lo que facilitó la absorción del elemento, ya que según lo indican Meiri *et al.* (1992), tiene una movilidad fuertemente dependiente del flujo xilemático, por lo que su transporte y deposición es facilitada por la transpiración. Así, la menor acumulación de este elemento en la hoja, bajo condiciones de compactación puede estar relacionada con la menor absorción de agua observada en estas condiciones, dada la alta abundancia y disponibilidad de este elemento en el suelo y su gran movilidad por flujo masal.

Cuadro 22. Contenido de macro y micronutrientes en hojas, para los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo.

Elemento	Tratamientos			
	Suplencia de agua		Preparación de Suelo	
	Riego	Estrés	Compactado	Subsolado
Nitrógeno (%)	3,30 a	3,40 a	3,45 a	3,25 a
Fósforo (%)	0,60 a	0,60 a	0,60 a	0,60 a
Potasio (%)	1,80 a	1,70 a	1,75 a	1,75 a
Calcio (%)	0,65 a	0,68 a	0,45 a	0,70 b
Magnesio (%)	0,30 a	0,30 a	0,30 a	0,30 a
Hierro (mg kg ⁻¹)	83,20 b	98,70 a	89,80 a	92,00 a
Manganeso (mg kg ⁻¹)	179,60 a	178,30 a	177,00 a	180,00 a

Letras distintas en la fila de cada tratamiento, difieren significativamente ($\alpha=5\%$).

La comparación de medias entre los genotipos, mostró que solo se observaron diferencias en la concentración de fósforo y hierro (Cuadro 23), donde C₁, alcanzó el nivel más alto de fósforo con relación a los demás genotipos cuyos valores fueron similares; sin embargo, todos alcanzaron una concentración suficientemente alta para considerarse como adecuada para afectar negativamente el desarrollo de la planta (Hussaini *et al.*, 2008). En el caso del hierro, el C₃ resultó con la mayor concentración a diferencia del C₄ con el más bajo promedio, lo que demostraría la variación genética existente en la acumulación de nutrientes, para los genotipos estudiados.

Cuadro 23. Contenido de elementos en hojas según los tratamientos de genotipos.

Elemento	Tratamientos			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
Fósforo (%)	0,72 a	0,55 b	0,57 b	0,53 b
Hierro (mg Kg ⁻¹)	87,30 ab	89,60 ab	116,10 a	70,50 b

Letras distintas en la línea difieren significativamente ($\alpha=5\%$).

Con formato: Fuente: 10 pto

Eliminado: Valores promedios

Con formato: Sangría: Izquierda: -0,19 cm, Sangría francesa: 2,25 cm

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Sangría: Izquierda: 0,25 cm

Con formato: Fuente: 10 pto

Eliminado: Valores promedios

Con formato: Fuente: 10 pto

Tabla con formato

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 10 pto

Con formato: Fuente: 9 pto

Con formato: Fuente: 9 pto

4.4. Análisis general del efecto de los tratamientos en las variables evaluadas

4.4.1. Variables de suelo

La caracterización física y química del suelo, demostró que este presenta una textura franca, con elevada fertilidad natural derivada según estudios previos (Strebin *et al.*, 1967; SOCODEC-Venezuela, 2002), de un material parental ferromagnésico, rico en nutrientes. Presenta baja porosidad total y baja estabilidad estructural, lo que ha contribuido junto al uso inadecuado de la maquinaria agrícola, en la formación de una capa compactada de unos 8 cm de espesor a 12 cm de profundidad, aproximadamente.

Al relacionar los resultados, puede sugerirse que la baja estabilidad estructural del suelo y la alta susceptibilidad a la erosión deducida del índice de separabilidad de partículas, son factores determinantes para favorecer la compactación subsuperficial observada, promovida por el excesivo uso de maquinaria e implementos agrícolas, bajo condiciones inadecuadas de humedad (Gardner, *et al.*, 1999; Hamza y Anderson, 2005).

Además, la pulverización del suelo y por consiguiente, el rompimiento de su estructura, promueven pérdidas de suelo por el viento y el agua, las cuales, aunque no se midieron, se evidenciaron en la finca, tanto en el aire con el pase del tractor (Anexo 8.2), como en la turbidez de las aguas de escorrentía, lo cual concuerda con lo reportado por Dimanche y Hoogmoed (2002) en este tipo de manejo, quienes señalan que el uso de arado de discos, al promover una mayor pulverización en la superficie del suelo, puede favorecer además la formación de sello superficial con la lluvia.

El alto grado de compactación en la capa de 12-20 cm de profundidad, unido a la baja proporción de macroporos observada, y la baja conductividad hidráulica, sugieren un limitado movimiento [del agua](#) a través de esta capa a otras más profundas. Dicho movimiento estaría afectado además por cambios producidos en la configuración de los poros (Kutílek (2004), cambios en características como la tortuosidad y conectividad, consideradas en los [modelos](#) de van Genuchten (1980), así como la destrucción de bioporos por la labranza (Dexter *et al.*, 2004). Asimismo, la mayor cantidad de arcilla de esta capa de suelo con relación a la capa superficial (0-12), contribuyó a aumentar la retención del agua por el suelo y reducir su movilidad (Pla, 1983; Hamza y Anderson, 2005).

Eliminado: Modelos

Tanto las características físicas de la capa compactada, como su comportamiento, significaron una baja disponibilidad de agua para las plantas, la cual dependió fuertemente tanto del contenido almacenado [en la capa superficial](#) del suelo, como de [su movilidad a la zona de raíces](#), en un momento dado (Ankeny *et al.*, 1991), ya que su conexión con la capa profunda fue muy limitada, según evidenció el análisis de la humedad [remanente](#) del suelo. Además, es de esperarse que el intercambio gaseoso hacia las raíces haya sido reducido, afectando su adecuado crecimiento y favoreciendo el movimiento lateral del agua [en la capa superficial](#).

Eliminado: la conductividad hidráulica

Eliminado: ,

Eliminado: ,

Eliminado: de

Eliminado: , hacia zonas más bajas

La aplicación del estrés hídrico, además de reducir la disponibilidad del agua, parece haber inducido un menor consumo del agua por el cultivo, ya que se evidenció mayor humedad remanente en el suelo en este tratamiento, comparado con el de riego. Este resultado, podría asociarse al menor desarrollo de las plantas y a la estimulación de mecanismos de escape o de resistencia como la regulación de la apertura de los estomas y el intercambio de [gases](#) en plantas bajo sequía como ha sido señalado por Wilkinson y Davies (2002), donde la concentración de ABA y el flujo de asimilados juega un importante rol, en el sistema regulatorio de la planta (Setter *et al.*, 2001).

La disponibilidad del agua en el suelo, estuvo favorecida por la aplicación continua de riego, lo que pudo estimular a través del desarrollo constante del cultivo, un mayor agotamiento del agua en el suelo en el tratamiento de riego, incluso por debajo del valor de marchitez permanente del suelo medido en el laboratorio, lo cual puede estar relacionado con la clase textural del suelo como ha sido sugerido por autores como Tolk y Evett (2012). El riego [periódico](#), pudo favorecer además variables como las condiciones térmicas de las plantas y la eficiencia en el uso de la radiación (Yi *et al.*, 2010). En genotipos de maíz con alto rendimiento como C₃ y C₄, el rápido crecimiento inicial conlleva a una mayor exploración del suelo y en consecuencia a un rápido agotamiento de la humedad del suelo (Amato y Ritchie, 2002).

Eliminado: periódico

La aplicación de subsolado, mejoró la disponibilidad de agua para el cultivo, posiblemente al generar cambios en el patrón de drenaje (Dimanche y Hoogmoed, 2002). No obstante, el mayor efecto de este tratamiento, fue el observado a través del análisis de los genotipos,

donde hubo un mejor desempeño de las plantas en la absorción de agua, generando un mayor agotamiento en el suelo, asociado a un mejor desarrollo radical. Es de esperarse que las condiciones de aireación mejoraran el funcionamiento radical y con ello la absorción de agua y nutrientes a la planta.

El subsolado afectó de forma significativa los genotipos C₂, C₄ y en especial el C₃, que resultó más sensible a la compactación, evidenciando una mayor diferencia en el agotamiento del agua entre los tratamientos. Al respecto, Bruckler *et al.* (1991), trabajando en un suelo cultivado con maíz, indicaron contenidos de humedad en los primeros 20 cm de la superficie de la zona de la hilera y en áreas no compactadas, de 0,2 m³ m⁻³, mientras en zonas compactadas se encontraron valores de 0.32 m³ m⁻³, para la misma fecha. Este resultado, fue asociado a un mayor agotamiento del agua bajo condiciones no compactadas.

El comportamiento diferencial del genotipo C₂, respecto a los comerciales (C₃ y C₄), el cual pudo agotar mayor humedad en el tratamiento compactado, sugiere que su conformación fenotípica, especialmente en la raíz, reduce el efecto negativo del impedimento mecánico por compactación. En este sentido, Bolaños *et al.*, (1993), indicaron que en la evolución de la selección del genotipo Tuxpeño (C₂), hubo una evidente pérdida de la biomasa radical y donde la ventaja competitiva de este genotipo estaría ligada en amplia medida a la regulación en el ajuste osmótico. Por otra parte, el genotipo C₁, mostró baja sensibilidad a los tratamientos de preparación de suelo.

Parece evidente que los genotipos C₁ y C₂, mostraron un mejor comportamiento bajo las condiciones de compactación en el suelo y baja disponibilidad de agua, alcanzando un uso más efectivo del agua del suelo. La activación de mecanismos fisiológicos como la regulación del consumo interno de la planta, o mejoras en la eficiencia de la evapotranspiración como lo señalan, Bänziger *et al.*, (2000), pudieron manifestarse en tales circunstancias, aunque no lograron medirse. No obstante, está reportado que genotipos tolerantes a estrés hídrico como el C₂, presentan características marcadamente diferentes, tales como un menor tamaño de la espiga y reducción de la biomasa radical en los primeros 50 centímetros del suelo, según lo describen Edmeades *et al.* (1996). Por otra parte, C₁ presentó el enrollamiento de las hojas en horas de alta temperatura diurna (Anexo 8.2),

Eliminado: donde

Eliminado: este

Eliminado: limitante mecánica

Eliminado: esta

Eliminado: ,

característica que reduciría la pérdida de agua por transpiración, mejorando su eficiencia en el uso del agua del suelo (Bänziger y Edmeades, 1996).

Los genotipos C₃ y C₄, se comportaron como se esperaría en un híbrido de alto rendimiento, capaces de absorber mayor cantidad de agua bajo las mejores condiciones de preparación de suelo como en el tratamiento riego-subsolado; este agotamiento del agua disponible, estaría en concordancia con el agotamiento de agua del suelo, observados durante el monitoreo.

Es importante resaltar que los genotipos C₃ y C₄, fueron sensiblemente más afectados por el estrés hídrico en el tratamiento de compactación, lo que podría relacionarse con problemas en el desarrollo radical de las plantas, ya que, como lo han indicado varios autores (Qin, et al., 2005; Bänziger et al., 2000), la biomasa radical se ve afectada por condiciones físicas adversas como la compactación u otras como el estrés hídrico.

4.4.2. Variables de la planta

El resumen de los resultados obtenidos en el análisis de varianza para las principales variables estudiadas en las plantas, indica que pocas variables de las analizadas, manifestaron diferencias entre los tratamientos estudiados (Cuadro 24).

Los tratamientos de suplencia de agua, produjeron cambios significativos, donde el tratamiento de estrés redujo el rendimiento en grano, el IAFt, el IAFv, la biomasa aérea en plantas adultas (98dds) y la altura de mazorca, mientras que aumentó el ASI y el hierro foliar.

Eliminado: ,

Eliminado: aumento

La condición de estrés hídrico, redujo en 10% el rendimiento de los genotipos, con relación al tratamiento de riego, siendo C₃ y C₄ los genotipos más afectados; sin embargo, tanto los tratamientos de preparación de suelo como de genotipos, no afectaron esta variable de forma significativa. Este resultado coincide con lo reportado por otros investigadores en mejoramiento de maíz quienes resaltan que el rendimiento es la característica más afectada bajo condiciones de estrés hídrico (Edmeades y Bänziger, 1996; Bolaños y Edmeades, 1993a; San Vicente *et al.*, 1999), especialmente en etapas tempranas de la fase de reproducción (Boyer y Westgate, 2004). Los genotipos C₁ y C₂, fueron los más estables en

cuanto al rendimiento, presentado promedios similares para ambas condiciones de suplencia de agua.

Cuadro 24. Resumen de los resultados del análisis de la varianza, para las principales variables estudiadas en la planta, según los tratamientos.

Tabla con formato

Variables	Tratamientos					
	Suplencia de agua (A)	Preparación de suelo (B)	Genotipo (C)	Interacción A x B	Interacción A x C	Interacción B x C
Rendimiento	5%	ns	ns	ns	ns	ns
ASI	5%	ns	ns	ns	ns	ns
IAFt	5%	ns	ns	ns	ns	ns
IAFv	5%	ns	ns	ns	ns	ns
Biomasa <u>aérea</u> (45 dds)	ns	1%	ns	ns	ns	ns
Biomasa <u>aérea</u> (98 dds)	5%	1%	5%	ns	1%	5%
Peso seco de raíces (45 dds)	ns	1%	ns	ns	ns	ns
Peso seco de raíces (98 dds)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Índice de cosecha	ns	ns	ns	ns	1%	ns
Altura de planta	ns	ns	1%	ns	ns	ns
Altura de mazorca	5%	ns	1%	ns	ns	ns
Calcio foliar	ns	5%	ns	ns	ns	ns
Hierro foliar	5%	ns	ns	ns	ns	ns

ns = no significativa; 1%= diferencias altamente significativas; 5%= diferencias significativas.

La variable ASI, aumentó en un día (1) bajo el tratamiento de estrés hídrico, lo que pudo contribuir a el bajo rendimiento de los genotipos en esta condición, al ocasionar fallas en la polinización, lo que según Chapman y Edmeades (1999), estaría asociado a la reducción del número de granos por metro cuadrado. El comportamiento de esta variable, es consistente con la mayoría de los estudios, al ser una de las características secundarias de mayor correlación con el rendimiento y altamente hereditaria en procesos de selección bajo condición de déficit hídrico (Bolaños y Edmeades, 1993a; Edmeades et al., 1996). El genotipo C₁, alcanzó el valor más bajo de ASI, aún en condiciones de estrés hídrico,

Eliminado: contribuyendo con el bajo rendimiento de los genotipos en esta condición, el cual

sugiriendo una alta estabilidad del genotipo para esta variable. Asimismo, los genotipos C₃ y C₄, resultaron los más afectados alcanzando valores mayores de 5 días bajo el tratamiento de estrés, superando los resultados reportados por San Vicente *et al.* (1999), para genotipos tropicales.

Eliminado: ,

El IAF, tanto en hojas totales como en hojas verdes estuvo afectado por el estrés hídrico, derivado de una reducción del 10% en el área foliar, lo que debió afectar el proceso de fotosíntesis (Boyer y Westgate, 2004).

Aunque en plantas jóvenes no se evidenciaron diferencias en la biomasa aérea, en plantas adultas fueron muy evidentes las diferencias, reduciéndose en un 30% bajo el tratamiento de estrés. Esta reducción se manifestó en todos los genotipos, especialmente en C₃ y C₄, alcanzando niveles del 50% en este último genotipo. Estos resultados sugieren que el estrés hídrico, afectó el desarrollo de las plantas en el largo plazo, especialmente los de alto rendimiento potencial. No obstante, el peso seco de raíces, no mostró cambios significativos tanto en plantas jóvenes como adultas para estos tratamientos.

Eliminado: (Figura 49)

Eliminado: ¶

Por otra parte, el estrés redujo la altura de mazorca, siendo afectados todos los genotipos, presentando C₂ el valor más bajo, lo que tiene relación por el porte bajo de este genotipo.

Eliminado: y

Eliminado: mas

La poca respuesta de las variables estudiadas ante el estrés hídrico, pudo estar relacionada a ajustes fisiológicos en los genotipos después de la etapa de estrés, que no pudieron evaluarse. Este comportamiento estaría asociado a características propias de cada genotipo y adaptaciones para reducir el efecto de la falta de humedad en etapas del ciclo de cultivo (Bänziger, et al., 2000; Bolaños y Edmeades, 1996). Sin embargo, no se descarta el efecto acumulativo o sinérgico de estas variables sobre el rendimiento, el cual es una característica compleja (Bänziger, et al., 2000) afectada por gran cantidad de elementos los cuales no se analizaron en el presente estudio.

Los tratamientos de preparación del suelo, no produjeron cambios importantes en la mayoría de las variables evaluadas en planta, afectando en forma altamente significativa solo la biomasa aérea en plantas jóvenes y adultas, el peso seco de raíces en plantas jóvenes y el calcio foliar.

Las diferencias observadas, tanto en la biomasa aérea, como en el peso seco de raíces, indicaron que la compactación redujo en forma altamente significativa el desarrollo vegetativo de las plantas, aunque en el caso de las raíces, las plantas adultas lograron recuperarse durante el ciclo. Tanto la partición de biomasa, como el IC, no indicaron cambios sustanciales, destacando las derivadas de la constitución genotípica, donde los genotipos C₁ y C₂ presentan un porte más bajo y menor desarrollo aéreo con relación a C₃ y C₄ como era de esperarse.

Los tratamientos de genotipo, evidenciaron diferencias significativas para la biomasa aérea, y altamente significativas para las características biométricas de altura de plantas y altura de mazorcas. Estas diferencias pueden ser atribuidas a las diferencias genotípicas propias, especialmente entre C₂, C₃ y C₄, lo cual pudo afectar la expresión de variables como el IAF y la relación IC.

Las diferencias en la concentración de nutrientes en las hojas, aunque resultaron significativas entre las medias con los elementos calcio y hierro, no se consideraron de trascendencia, debido a que todos estuvieron en niveles considerados como óptimos para el desarrollo de la planta (Hussaini *et al.*, 2008).

Los resultados evidencian diferencias genotípicas y adaptativas entre los genotipos que pudieron derivar en la capacidad de extracción y eficiencia de uso del agua del suelo (Bänzinger *et al.*, 2000).

4.5. Variables climáticas en el ensayo

4.5.1. Precipitación y temperatura ambiental en la unidad experimental

El registro de la precipitación, reveló un total de 257,8 mm de agua caídos durante la etapa de crecimiento del cultivo, la cual ocurrió de manera efectiva después de los 50 dds, (Cuadro 25). A los 32 días, ocurrió una llovizna esporádica de 2 mm, y fue a partir de los 51 días, cuando el período lluvioso comenzó con precipitaciones leves de 5 mm, aunque insuficientes para suspender el riego durante el ensayo.

La temperatura ambiental medida en horas del mediodía, tuvo un promedio de 30°C durante la etapa de crecimiento, con variaciones de entre 3 y 4 grados diarios, reduciéndose un poco a 28°C, al inicio de la época lluviosa.

Eliminado: etapa

Cuadro 25. Valores de precipitación acumulada durante el ensayo y promedio de temperatura ambiental por períodos de 15 días.

Variables	Días después de la siembra							
	15	30	45	60	75	90	105	110
Precipitación (mm)	0	0	2	71	139,3	228,8	257,8	287,8
Temperatura (°C)	30± 4	30± 4	30± 4	30± 4	30± 3	29± 4	28± 3	28± 3

4.5.2. Temperatura de la hoja y humedad relativa ambiental en el cultivo

El promedio de la temperatura en la superficie de las hojas por genotipo estuvo en 23°C, no mostrando diferencias entre los genotipos. Por otra parte, la variabilidad en las mediciones, estuvo muy asociada a las condiciones ambientales de nubosidad y viento; sin embargo, el genotipo menos variables fue el C₃ y el de mayor variación el C₄ (Cuadro 26).

Los resultados arrojaron un promedio general entre 74 y 76% de humedad relativa, aunque su alta variabilidad durante el ensayo según las condiciones de lluvia y el genotipo, propició una alta desviación estándar en el registro (Cuadro 26).

Subido [4]: La humedad relativa del ambiente por tratamiento de genotipo, se calculó derivándola de la temperatura máxima y mínima del aire obtenida en el horario de 11:00 am a 12:00 m.

Con formato: Resaltar

Eliminado: variabilidad

Cuadro 26. Valores promedios de temperatura en la hoja y humedad relativa del medio ambiente por genotipo, medidos durante el período de estrés, entre 11:30 am y 12 m.

Variables	Genotipos			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
Temperatura de la hoja (°C)	23 ± 0,08 a	23 ± 0,09 a	24 ± 0,05 a	23 ± 0,1 a
Humedad relativa (%)	75 ± 10 a	76 ± 11 a	75 ± 10 a	74 ± 10 a

Letras distintas en la fila, difieren significativamente ($\alpha=5\%$).

Los resultados de la evaluación de la temperatura de la hoja por tratamiento, durante la aplicación del estrés, no evidenciaron diferencias entre los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo (Cuadro 27), alcanzando un promedio general de 23,7 °C, lo cual resultó inferior en 7°C a la temperatura ambiental. En cada genotipo, el promedio de la

temperatura varió entre 0,1 y 0,2 °C para los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo, el cual es un rango muy estrecho para evidenciarse diferencias.

Cuadro 27. Valores promedios de temperatura en la hoja por tratamiento, durante el período de estrés, entre 11:30 am y 12 m.

Tratamiento			Temperatura (°C)
Genotipo	Suplencia de agua	Preparación de suelo	
C ₁	Riego	Compactado	24,0 a
		Subsolado	23,9 a
	Estrés	Compactado	23,9 a
		Subsolado	23,8 a
C ₂	Riego	Compactado	23,9 a
		Subsolado	23,8 a
	Estrés	Compactado	23,7 a
		Subsolado	23,7 a
C ₃	Riego	Compactado	23,8 a
		Subsolado	23,8 a
	Estrés	Compactado	23,9 a
		Subsolado	23,6 a
C ₄	Riego	Compactado	23,9 a
		Subsolado	23,0 a
	Estrés	Compactado	24,0 a
		Subsolado	23,3 a

Letras distintas difieren significativamente ($\alpha=5\%$).

Al respecto, Bolaños *et al.* (1993), midiendo la temperatura de las hojas con termómetro infrarrojo, encontraron diferencias entre genotipos tolerantes bajo condiciones de estrés, con temperaturas superiores hasta en 0,5°C con relación a la temperatura del ambiente, mientras que en tratamientos bien regados, se observaron temperaturas inferiores hasta de 7°C con relación al ambiente; sin embargo, destacaron la alta variabilidad y el error de medición por efecto de variables ambientales como el viento y la nubosidad.

4.6. Balance hídrico

Bajo la premisa de considerar una profundidad efectiva de 12 cm, dados los resultados previos analizados sobre el comportamiento de la humedad durante el ciclo de cultivo y

considerando un contenido de agua aprovechable de 21,53% ($v v^{-1}$), se estimó la reserva de agua disponible para las plantas en 24,6 mm. Además, como se consideró el efecto de cultivo en forma general, sin juzgar las diferencias genotípicas de las plantas, el balance hídrico destacó la preponderancia de los efectos de los tratamientos de suplencia de agua, así como el efecto de la capa compactada al limitar la profundidad efectiva.

La ET_c expresada en lámina de agua diaria en el suelo calculado para cada etapa de desarrollo (Cuadros 28, 29, 30 y 31), significó para el tratamiento de riego, un total de 339,74 mm, con una diferencia de 53,25 mm con relación al tratamiento de estrés (Cuadro 33).

Al analizar los resultados, destaca que para el tratamiento de riego, durante los primeros 80 días del ciclo de cultivo no hubo déficit hídrico registrado en el suelo, presentándose déficits hídricos temporales solo en la etapa de llenado de grano (81-89 dds) y al final del ciclo después de los 100 dds (Cuadros 30 y 31), cuando las precipitaciones no fueron de suficiente cantidad y efectividad para suplir los requerimientos del cultivo de maíz (Bustamante *et al.*, 2006; FAO, 2013). La principal causa de estas deficiencias, fue la poca profundidad efectiva tanto para el almacenamiento de agua como para el desarrollo radical, ya que el riego, se calculó sobre la base de alcanzar una profundidad efectiva de al menos 30 cm, con lo cual se almacenaría y supliría el agua requerida por el cultivo.

No obstante, estas deficiencias al presentarse después de los 80 días, no se consideran de importancia para efectos del estudio, pues el tratamiento de estrés duró hasta los 50 días después de la siembra, por lo que estaría afectándose de forma similar ambos tratamientos de suplencia de agua. En tal sentido, Fuentes y García (1999) indican que bajo tales condiciones los genotipos pueden presentar ciertas señales de marchitamiento temporal, que se revierten rápidamente al no prolongarse en el tiempo.

Cuadro 28. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo (dn), para el tratamiento de riego, en la etapa vegetativa.

Etapa	dds	$d_{n-1}(mm)$	$Pe(mm)$	$R(mm)$	Aw	$Ln((Aw)+1)$	Kh	$Etc(mm)$	$dn(mm)$
Vegetativa	1	39,84	0	0	100,00	4,62	1,00	2,13	37,71
	2	37,71	0	2,13	100,00	4,62	1,00	2,13	37,71
	3	37,71	0	0	91,76	4,53	0,98	2,09	35,62
	4	35,62	0	0	83,67	4,44	0,96	2,05	33,57
	5	33,57	0	0	75,74	4,34	0,94	2,00	31,57
Germinación	6	31,57	0	0	67,99	4,23	0,92	1,95	29,61
	7	29,61	0	0	60,42	4,12	0,89	1,90	27,71
	8	27,71	0	12,13	100,00	4,62	1,00	2,13	37,71
	9	37,71	0	0	91,76	4,53	0,98	2,09	35,62
	10	35,62	0	0	83,67	4,44	0,96	2,05	33,57
	11	33,57	0	0	75,74	4,34	0,94	2,00	31,57
	12	31,57	0	0	67,99	4,23	0,92	1,95	29,61
	13	29,61	0	0	60,42	4,12	0,89	1,90	27,71
	14	27,71	0	0	53,07	3,99	0,86	1,84	25,87
	15	25,87	0	13,97	100,00	4,62	1,00	2,13	37,71
	16	37,71	0	0	91,76	4,53	0,98	2,09	35,62
	17	35,62	0	0	83,67	4,44	0,96	2,05	33,57
	18	33,57	0	0	75,74	4,34	0,94	2,00	31,57
	19	31,57	0	0	67,99	4,23	0,92	1,95	29,61
	20	29,61	0	0	60,42	4,12	0,89	1,74	27,87
	21	27,87	0	0	53,69	4,00	0,87	1,69	26,18
	22	26,18	0	0	47,15	3,87	0,84	1,64	24,55
	23	24,55	0	15,29	100,00	4,62	1,00	1,95	37,89
	24	37,89	0	0	92,45	4,54	0,98	1,92	35,97
	25	35,97	0	0	85,03	4,45	0,97	1,88	34,09
	26	34,09	0	0	77,75	4,37	0,95	1,84	32,25
	27	32,25	0	0	70,61	4,27	0,93	1,80	30,44
	28	30,44	0	0	63,63	4,17	0,90	1,76	28,68
	29	28,68	0	0	56,81	4,06	0,88	1,71	26,97
	30	26,97	0	12,87	100,00	4,62	1,00	1,95	37,89
	31	37,89	0	0	92,45	4,54	0,98	1,92	35,97
	32	35,97	0	0	85,03	4,45	0,97	1,88	34,09
	33	34,09	0	0	77,75	4,37	0,95	1,84	32,25
	34	32,25	0	0	70,61	4,27	0,93	1,80	30,44
	35	30,44	0	0	63,63	4,17	0,90	1,76	28,68
Total									67,55

dds: días después de la siembra; d_{n-1} : lámina de agua en el suelo el día n-1; Pe: precipitación efectiva; R: riego; Aw: porcentaje de agua disponible; Kh: coeficiente de humedad del suelo; Ln: logaritmo neperiano; Etc: evapotranspiración real.

Cuadro 29. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo (d_n), para el tratamiento de riego, en la etapa de floración.

Etapa	dds	$d_{n-1}(mm)$	$Pe(mm)$	$R(mm)$	Aw	$Ln((Aw)+1)$	Kh	$Etc (mm)$	$d_n (mm)$
Floración	36	28,68	0	0	56,81	4,06	0,88	4,57	24,11
	37	24,11	0	15,73	100,00	4,62	1,00	5,20	34,64
	38	34,64	0	0	79,88	4,39	0,95	4,95	29,69
	39	29,69	0	0	60,72	4,12	0,89	4,65	25,05
	40	25,05	0	0	42,74	3,78	0,82	4,26	20,79
	41	20,79	0	19,05	100,00	4,62	1,00	5,20	34,64
	42	34,64	0	0	79,88	4,39	0,95	4,95	29,69
	43	29,69	0	0	60,72	4,12	0,89	4,65	25,05
	44	25,05	0	0	42,74	3,78	0,82	4,26	20,79
	45	20,79	0	19,05	100,00	4,62	1,00	5,20	34,64
	46	34,64	0	0	79,88	4,39	0,95	4,95	29,69
	47	29,69	0	0	60,72	4,12	0,89	4,65	25,05
	48	25,05	0	0	42,74	3,78	0,82	4,26	20,79
	49	20,79	0	0	26,27	3,31	0,72	3,72	17,06
	50	17,06	0	0	11,86	2,55	0,55	2,48	14,58
	51	14,58	0	32,80	100,00	4,62	1,00	4,48	39,84
	52	39,84	9	0	100,00	4,62	1,00	4,48	39,84
	53	39,84	0	0	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	54	35,36	32,8	0	100,00	4,62	1,00	4,48	39,84
	55	39,84	0	0	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	56	35,36	3,2	0	95,05	4,56	0,99	4,43	34,13
	57	34,13	0	0	77,90	4,37	0,95	4,24	29,89
	58	29,89	0	9,95	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	59	35,36	3,2	0	95,05	4,56	0,99	4,43	34,13
	60	34,13	0	0	77,90	4,37	0,95	4,24	29,89
	61	29,89	8,8	0	95,54	4,57	0,99	4,44	34,25
	62	34,25	0	0	78,38	4,37	0,95	4,25	30,01
	63	30,01	20,8	0	100,00	4,62	1,00	4,48	39,84
	64	39,84	0	0	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	65	35,36	0	4,48	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	66	35,36	5,6	0	100,00	4,62	1,00	4,48	36,48
	67	36,48	0	0	87,00	4,48	0,97	4,35	32,13
	68	32,13	0	0	70,18	4,27	0,92	4,14	27,99
	69	27,99	12	0	100,00	4,62	1,00	4,48	35,51
	70	35,51	0	0	83,26	4,43	0,96	4,30	31,21
Total								156,03	

dds: días después de la siembra; d_{n-1} : lámina de agua en el suelo el día n-1; Pe: precipitación efectiva; R: riego; Aw: porcentaje de agua disponible; Kh: coeficiente de humedad del suelo; Ln: logaritmo neperiano; Etc: evapotranspiración real.

Cuadro 30. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo (dn), para el tratamiento de riego, en la etapa de llenado de grano.

Etapa	dds	$d_{n-1}(mm)$	$Pe(mm)$	$R(mm)$	Aw	$Ln((Aw)+1)$	Kh	$Etc(mm)$	$dn(mm)$
Llenado de grano	71	31,21	0	0	66,60	4,21	0,91	6,14	25,07
	72	25,07	3,2	0	55,24	4,03	0,87	5,87	22,41
	73	22,41	0	0	32,53	3,51	0,76	5,11	17,29
	74	17,29	0	0	12,74	2,62	0,57	3,82	13,48
	75	13,48	4,8	0	16,55	2,87	0,62	4,17	14,10
	76	14,10	20	0	77,81	4,37	0,95	6,36	27,75
	77	27,75	0	0	53,20	3,99	0,87	5,81	21,93
	78	21,93	0	0	30,70	3,46	0,75	5,03	16,90
	79	16,90	4,8	0	29,80	3,43	0,74	4,99	16,71
	80	16,71	0	0	10,48	2,44	0,53	2,71	14,00
	81	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	82	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	83	14,00	2,4	0	9,29	2	1	2,40	14,00
	84	14,00	2,4	0	9,29	2	1	2,40	14,00
	85	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	86	14,00	1,6	0	6,19	2	0,43	1,60	14,00
	87	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	88	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	89	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	90	14,00	30,4	0	100,00	4,62	1,00	5,16	39,84
91	39,84	0	0	100,00	4,62	1,00	5,16	34,68	
92	34,68	0	0	80,03	4,39	0,95	4,91	29,77	
93	29,77	0	0	61,02	4,13	0,89	4,61	25,15	
94	25,15	4	0	58,64	4,09	0,89	4,57	24,58	
95	24,58	0	0	40,95	3,74	0,81	4,18	20,40	
Total								85,01	

dds: días después de la siembra; d_{n-1} : lámina de agua en el suelo el día n-1; Pe: precipitación efectiva; R: riego; Aw: porcentaje de agua disponible; Kh: coeficiente de humedad del suelo; Ln: logaritmo neperiano; Etc: evapotranspiración real.

Por tanto, a pesar de la poca profundidad efectiva considerada, puede valorarse como adecuada la suplencia de la demanda hídrica diaria para las dos primeras etapas, con la frecuencia de riego usada. Tanto la etapa de llenado de grano, como la de maduración estuvieron un poco más afectadas, por la escasa precipitación que se produjo en algunos días. Además, hay que destacar que el porcentaje de agua disponible(Aw), al afectar el coeficiente de humedad del suelo, redujo la ETc, en los días donde hubo déficit hídrico.

Cuadro 31. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo (dn), para el tratamiento de riego, en la etapa de maduración.

Etapa	dds	$d_{n-1}(mm)$	$Pe(mm)$	$R(mm)$	Aw	$Ln((Aw)+1)$	Kh	$Etc(mm)$	$dn(mm)$
Maduración	96	20,40	0	0	24,78	3,25	0,70	2,12	18,28
	97	18,28	11,2	0	16,58	2,87	0,62	1,87	27,61
	98	27,61	0	0	52,69	3,98	0,86	2,60	25,02
	99	25,02	0	0	42,63	3,78	0,82	2,46	22,55
	100	22,55	0	0	33,10	3,53	0,76	2,30	20,25
	101	20,25	8	0	24,19	3,23	0,70	2,10	26,15
	102	26,15	0	0	47,01	3,87	0,84	2,52	23,62
	103	23,62	0	0	37,24	3,64	0,79	2,38	21,25
	104	21,25	4	0	28,04	3,37	0,73	2,20	23,05
	105	23,05	0	0	35,02	3,58	0,78	2,34	20,71
	106	20,71	0	0	25,97	3,29	0,71	2,15	18,56
	107	18,56	2,4	0	17,66	2,93	0,63	1,91	19,05
	108	19,05	0	0	19,56	3,02	0,66	1,97	17,08
	109	17,08	0	0	11,93	2,56	0,55	0,73	16,36
	110	16,36	0	0	9,12	2,31	0,50	1,51	14,85
Total								31,16	

dds: días después de la siembra; d_{n-1} : lámina de agua en el suelo el día n-1; Pe: precipitación efectiva; R: riego; Aw: porcentaje de agua disponible; Kh: coeficiente de humedad del suelo; Ln: logaritmo neperiano; Etc: evapotranspiración real.

Este análisis destaca la importancia de mantener un monitoreo continuo de la humedad del suelo, previendo la aplicación de riegos temporales aún bajo condiciones de entrada de lluvias. No obstante, en el campo esta práctica resulta difícil de aplicar debido a las dificultades en el manejo de la maquinaria de riego una vez iniciado el período lluvioso (Fuentes, 1998).

El análisis para el tratamiento de estrés, reflejó que bajo este tratamiento, se produjo un déficit continuo durante la etapa de floración desde los 37 a los 50 dds. (Cuadro 32). Este prolongado período, se puede considerar de gran impacto sobre el desarrollo del cultivo, ya que las plantas estaban sometidas a alta temperatura y alta humedad relativa ambiental, además se evidencia la mayor demanda hídrica del cultivo, al duplicarse la ETC en la etapa de floración.

Cuadro 32. Valores promedio de la lámina de agua diaria en el suelo (dn), para el tratamiento de estrés, en la etapa de floración.

Etapa	dds	d_{n-1}	Pe	R	Aw	$Ln((Aw)+1)$	Kh	ETc	dn (mm)
Floración	36	28,68	0	0	56,81	4,06	0,88	4,57	24,11
	37	24,11	0	0	39,12	3,69	0,80	4,16	19,95
	38	19,95	0	0	23,02	3,18	0,69	3,58	16,37
	39	16,37	0	0	9,16	2	1	2,37	14,00
	40	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	41	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	42	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	43	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	44	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	45	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	46	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	47	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	48	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	49	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	50	14,00	0	0	0,00	0	0	0	14,00
	51	14,00	0	25,84	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	52	39,84	9	0	100,00	4,62	1,00	4,48	39,84
	53	39,84	0	0	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	54	35,36	32,8	0	100,00	4,62	1,00	4,48	39,84
	55	39,84	0	0	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	56	35,36	3,2	0	95,05	4,56	0,99	4,43	34,13
	57	34,13	0	0	77,90	4,37	0,95	4,24	29,89
	58	29,89	0	9,95	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	59	35,36	3,2	0	95,05	4,56	0,99	4,43	34,13
	60	34,13	0	0	77,90	4,37	0,95	4,24	29,89
	61	29,89	8,8	0	95,54	4,57	0,99	4,44	34,25
	62	34,25	0	0	78,38	4,37	0,95	4,25	30,01
	63	30,01	20,8	0	100,00	4,62	1,00	4,48	39,84
	64	39,84	0	0	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	65	35,36	0	4,48	100,00	4,62	1,00	4,48	35,36
	66	35,36	5,6	0	100,00	4,62	1,00	4,48	36,48
	67	36,48	0	0	87,00	4,48	0,97	4,35	32,13
	68	32,13	0	0	70,18	4,27	0,92	4,14	27,99
	69	27,99	12	0	100,00	4,62	1,00	4,48	35,51
70	35,51	0	0	83,26	4,43	0,96	4,30	31,21	
Total									102,78

dds: días después de la siembra; d_{n-1} : lámina de agua en el suelo el día n-1; Pe: precipitación efectiva; R: riego; Aw: porcentaje de agua disponible; Kh: coeficiente de humedad del suelo; Ln: logaritmo neperiano; Etc: evapotranspiración real.

Es de resaltar que aunque para el balance se consideró como límite inferior para el agua disponible, la contenida a un potencial equivalente al punto de marchitez permanente, las mediciones en campo evidenciaron contenidos de humedad por debajo de estos límites. Por otra parte, es necesario considerar el descenso brusco en la curva de humedad del suelo (Figura 4), al reducirse el potencial mátrico de -300 a -500 kPa, significando una mayor dificultad del cultivo para acceder al agua remanente en este suelo a este potencial, lo que pudo influenciar su disponibilidad después de suspendido el riego.

Es de esperarse que las plantas estuvieran sometidas a fuerte estrés hídrico, afectando su desarrollo y la producción de grano (Boyer y Westgate, 2004). Sin embargo, aunque este déficit hídrico en la etapa de floración pudo afectar la actividad fotosintética de las plantas (Chapman y Edmeades, 1999), las respuestas adaptativas como el ajuste osmótico (Sobrado, 1986), pudo inducir cambios que condicionaran la demanda hídrica interna y con ello, producir diferencias en la ETC, que no fueron registradas.

La comparación de la ETC para los tratamientos de suplencia de agua (Cuadro 33), muestra un consumo hídrico estimado de 339,74 mm para el tratamiento de riego, durante un ciclo de 110 días del cultivo. El tratamiento de estrés, indica una reducción hídrica equivalente a 53,61 mm durante la etapa de floración, con relación al tratamiento de riego (Figura 62), alcanzando un consumo total de 286,5 mm. En ambos tratamientos, el agua consumida estaría por debajo del rango estimado para el cultivo de maíz en este tipo de ciclo, estimado entre 500 y 800 mm (FAO, 2003).

Cuadro 33. Comparación del Etc del cultivo bajo los tratamientos de suplencia de agua, considerando una profundidad efectiva de 12 cm.

Etapa	Riego (mm)	Estrés (mm)
Vegetativa	67,55	67,55
Floración	156,03	102,78
Llenado	85,01	85,01
Madurez	31,40	31,16
Total:	339,74	286,50
Diferencia:	53,25	

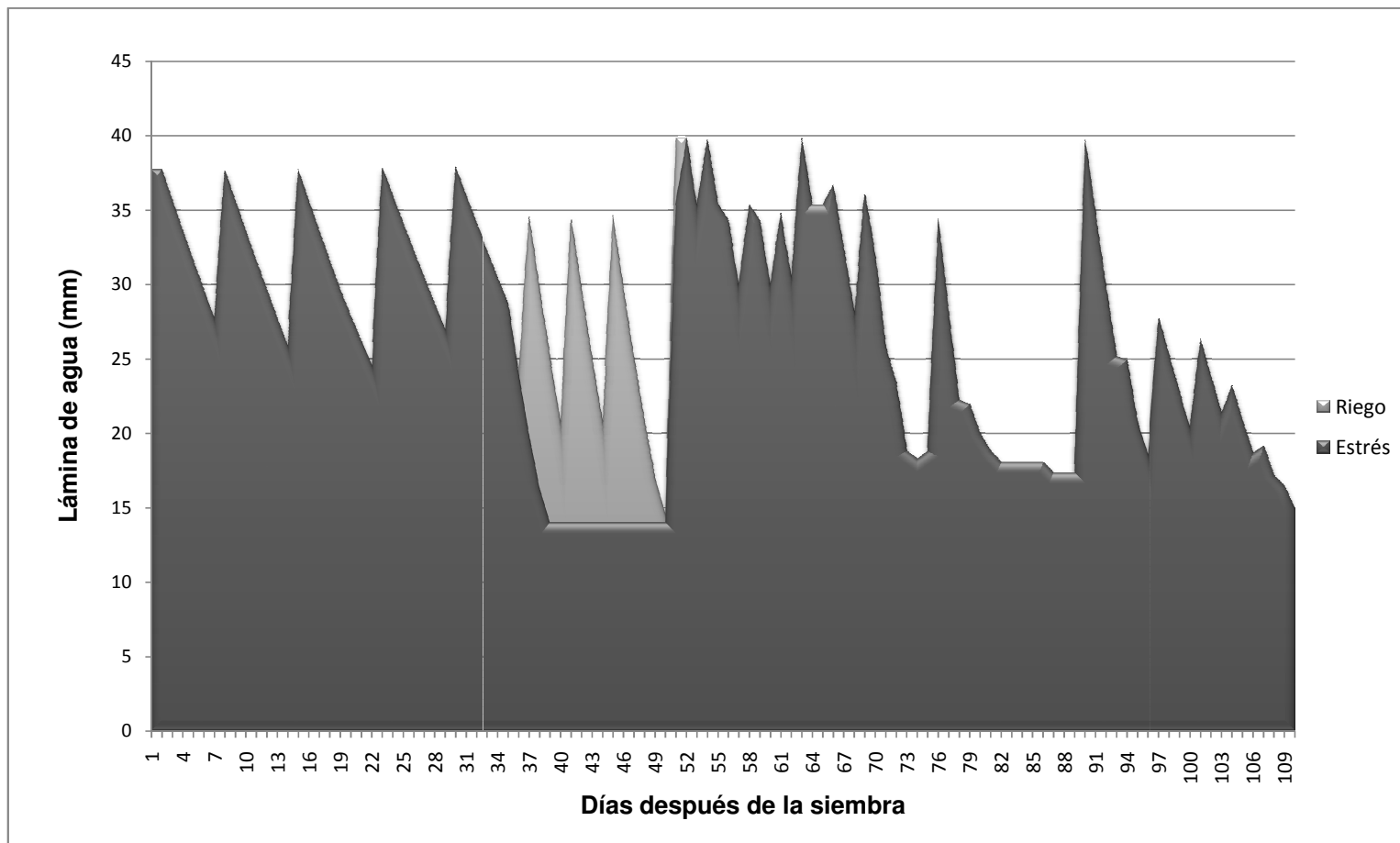


Figura 62. Distribución de la lámina de agua en la capa superficial (0-12) del suelo, para los tratamientos de suplencia de aguadurante el ciclo de cultivo.

4.7. Factor de respuesta general del cultivo (K_y)

Se realizó el cálculo de K_y , considerando la producción general del ensayo, bajo la premisa de una profundidad efectiva de 12 cm, considerando la capa superficial como la almacenadora del agua disponible para el cultivo.

Calculando el primer factor de la ecuación:

$$Y_m = 4,11$$

$$Y_a = 3,66$$

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \frac{3,66}{4,11} = 0,11$$

Calculando el segundo factor de la ecuación:

$$1 - \frac{ET_a}{ET_m} = 1 - \frac{279,43}{333,04} = 0,16$$

$$K_y = 0,69$$

El resultado obtenido, indica que la disminución del rendimiento se hace proporcionalmente en 0,69 al aumento del déficit hídrico alcanzado por la ET_c . Sin embargo, debemos reconocer las diferencias genotípicas ya señaladas, que podrían afectar este valor, así como la eficiencia en el uso del agua por el cultivo, lo cual restringiría esta relación.

4.8. Producción obtenida con la Evapotranspiración actual (Etc)

Como K_y depende tanto del cultivo como de la fase de desarrollo, se calculó la relación de rendimiento para la etapa de floración, que fue cuando se produjo el déficit hídrico, usando los valores de Etc y ET_m , para esta etapa resumidos en el cuadro 33:

Considerando un K_y para maíz de 1,5 en el período de floración según FAO (2013), se tiene:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = 1,5 \left(1 - \frac{ET_c}{ET_m} \right)$$

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = 1,5 \left(1 - \frac{279,43}{333,04} \right) = 0,24$$

$$Y_a = 0,76 Y_m$$

Este resultado indica que el rendimiento obtenido sería el 76 % del máximo posible en condiciones de adecuada suplencia de agua. Este resultado es mayor a la diferencia obtenida para el tratamiento de suplencia de agua, donde el tratamiento de estrés redujo en 10% los rendimientos. No obstante, es necesario considerar que estos valores son promedios de genotipos diferentes, sometidos a tratamientos donde su expresión fue en algunos casos contrapuesta, lo cual reflejaría diferencias importantes en el coeficiente K_y .

5. CONCLUSIONES

El tratamiento de estrés, resultó en un aumento del agua remanente del suelo, significando una reducción en el consumo hídrico por las plantas. El balance hídrico estimó esta reducción a un equivalente de 53,25 mm (16%) con relación al tratamiento de riego, alcanzando un consumo de agua total de 286,50 mm bajo el tratamiento de estrés. Asimismo, la reducción en el porcentaje de agua disponible en el suelo (A_w), afectó de manera importante la ETC en la etapa de floración.

La aplicación de riego continuo, aumentó el consumo de agua por las plantas, produciéndose un mayor agotamiento en la capa superficial del suelo. La estabilidad de la humedad remanente en la capa compactada (12-20 cm) durante el ciclo de cultivo, indicó un limitado movimiento a través de esta capa tanto a la capa superficial, como a la capa más profunda, por lo que puede deducirse que la profundidad efectiva para el cultivo estuvo limitada a la capa superficial. Esto, limitó el agua disponible para el cultivo a 21,53% (v/v) en los 12 cm superficiales, por lo que la reserva de agua disponible estimada para la planta, fue de 25,85 mm.

La dinámica del agua en el suelo, estuvo afectada por las condiciones físicas de las capas de suelo, donde la presencia de una capa compactada de 12-20 cm de profundidad, con baja porosidad, muy baja conductividad hidráulica saturada y alta densidad aparente, condicionó el almacenamiento y el movimiento de agua en el suelo.

La aplicación del subsolado, redujo la variabilidad de los valores de resistencia a la penetración en la capa compactada, sugiriendo que el pase del subsolador pudo remover la capa más densa de la zona compactada.

La presencia de una capa compactada, produjo una reducción en la acumulación de biomasa aérea tanto en plantas jóvenes como adultas, siendo los genotipos C_3 y C_4 los más afectados. Por otra parte, no afectó el índice de cosecha en los genotipos, especialmente los que mostraron tolerancia al estrés como C_1 y C_2 .

El tratamiento de estrés hídrico, afectó significativamente el rendimiento de los genotipos, produciendo una reducción del 10% bajo esta condición. Tanto los tratamientos de preparación de suelo y de genotipo, como las interacciones, no afectaron esta variable de

forma significativa, sugiriendo que hubo independencia en el efecto de los tratamientos evaluados sobre el rendimiento. El genotipo más afectado fue C₃, que redujo en más de 25% su rendimiento bajo la condición de estrés. La partición de biomasa y el índice de cosecha, no indicaron tendencias consistentes que explicaran los resultados observados en el rendimiento. Adicionalmente, el factor de respuesta general del cultivo (K_y) obtenido fue de 0,69, significando que la disminución del rendimiento se hace proporcionalmente en un 69% al aumento del déficit hídrico alcanzado, lo que contrastó con la reducción real ya señalada en el rendimiento.

El déficit hídrico redujo en más de 30% la biomasa aérea en plantas adultas. Esta reducción aunque se manifestó en todos los genotipos, destacó en el genotipo C₄, el cual expresó una reducción de más del 50%, bajo el tratamiento de estrés.

El tratamiento de estrés hídrico produjo un aumento del ASI en más de un día, con relación al tratamiento de riego, aumentando con ello, la probabilidad de fallas en la polinización. Destacó el genotipo C₁, el cual alcanzó los valores más bajos de ASI, aún en condiciones de estrés hídrico, sugiriendo una alta estabilidad para esta variable, mientras los genotipos C₃ y C₄ fueron los más afectados alcanzando valores superiores a 5 días en la interacción estrés-subsolado.

La altura de planta, no resultó afectada por los tratamientos de suplencia de agua y preparación de suelo, destacando las derivadas de la constitución genotípica; no obstante, la altura de mazorca se redujo significativamente bajo condiciones de estrés hídrico, afectando todos los genotipos. El índice de área foliar disminuyó en 10% bajo el tratamiento de estrés hídrico, por efecto directo de la reducción del área foliar. El genotipo C₁, mostró como característica relevante, el enrollamiento de las hojas en horas de alta luminosidad y calor, permitiendo una mayor eficiencia en el uso del agua del suelo.

Los genotipos alcanzaron un adecuado nivel de nutrientes en las hojas, resaltando solo el hierro con un elevado nivel bajo condiciones de estrés. Por otra parte, el tratamiento de subsolado favoreció la acumulación de calcio, lo que pudo relacionarse al mayor agotamiento hídrico bajo estas condiciones. No obstante, las diferencias con los elementos calcio y hierro, en general la concentración de nutrientes en las hojas estuvieron en niveles considerados como óptimos para el desarrollo de la planta.

El análisis de la partición de los órganos de la planta, no reveló diferencias que pudieran asociarse tanto con los tratamientos de suplencia de agua, como con los resultados de las variables rendimiento y ASI, medidas en la investigación. La variación observada en el peso seco de los órganos, fue proporcional para todos los tratamientos, no mostrando cambios significativos bajo la condición de estrés hídrico. Aunque resultó evidente, cierta respuesta adaptativa en el genotipo C₁, como el enrollamiento de las hojas, esto no se reflejó en la redistribución de biomasa entre los órganos, significando ajustes fisiológicos a otro nivel menos perceptivo.

El peso seco de raíces indicó diferencias en plantas jóvenes para los tratamientos de preparación de suelo, las cuales no se observaron en plantas adultas. La reducción en la acumulación de materia seca en etapa temprana del desarrollo, reflejó una alta sensibilidad de la raíz de los genotipos a la presencia de la capa compactada del suelo. No obstante, la homogeneidad de los valores en plantas adultas una vez suspendido el estrés hídrico, sugirió la recuperación del sistema radical a través del ciclo de cultivo,.

Se podría señalar que el peso seco en raíces, es una variable poco robusta para observar variaciones pequeñas en este órgano, ya que durante el ciclo de cultivo, los genotipos producen cambios inconsistentes, que impidieron evidenciar diferencias entre los tratamientos.

6. RECOMENDACIONES

- Continuar con estudios de campo, en forma interdisciplinaria, donde se evalúen múltiples factores de suelo, cultivo y manejo.
- Profundizar los estudios de movimiento de agua bajo condiciones de manejo controlado, con un monitoreo continuo, utilizando equipos de mayor precisión.
- Evaluar los efectos del subsolado en las características físicas de las capas compactadas, unido con otras prácticas agrícolas complementarias.
- Incorporar nuevos métodos de evaluación de raíces, más sensibles a cambios tanto de la arquitectura como a su redistribución en el suelo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdollahi, L.; L. J. Munkholm. 2014.** Tillage system and cover crop effects on soil quality: I. Chemical, mechanical and biological properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 78 (1): 262-270.
- Algayer, B.; Y. Le Bissonais; F. Darboux. 2014.** Short-term dynamics of soil aggregate stability in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 78 (4): 1168-1176.
- Alletto, L.; Y. Coquet; P. Vachier ; C. Labat. 2006.** Hydraulic conductivity, immobile water content, and exchange coefficient in three soil profiles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1272-1280.
- Amato M; J. T. Ritchie, 2002.** Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Sci.* 42: 773-780.
- Amos B.; D. T. Walters. 2006.** Maize roots biomass and net rhizodeposited carbon: an analysis of the literature. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70: 1489-1503.
- Ankeny, M. D.; M. Ahmed; T. C. Kasper; R. Horton. 1991.** Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 467-470.
- Arnoldus, H.M. 1980.** An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. En: De Boodt M., and Gabriels D. (Eds) Assessment of erosion. John Wiley and Sons, Inc. Chichester, West Sussex, UK. 127 – 132.
- Ascencio, J. 2000.** Fisiología de la planta de maíz. *In* El maíz en Venezuela. Fundación Polar. Caracas. pp. 27-31.
- Atwell, B. J. 1990a.** The effect of soil compaction on wheat during early tillering. I. Growth, development and root structure. *New Phytol.*, 115, 29-35.
- Atwell, B. J. 1990b.** The effect of soil compaction on wheat during early tillering. II. Concentrations of cell constituents. *New Phytol.*, 115, 37-41.
- Atwell, B. J. 1990c.** The effect of soil compaction on wheat during early tillering. III. Fate of carbon transported to the roots. *New Phytol.*, 115, 43-49.
- Atwell, B. J. 1993.** Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33:27-40.
- Bänziger, M.; G. O. Edmeades. 1996.** Genotypic variation for transpiration efficiency in a lowland tropical maize population. *In* Proceedings of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize. CIMMYT, México. pp. 189-191.
- Bänziger, M.; G. O. Edmeades; D. Beck; M. Bellon. 2000.** Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: From theory to practice. México D. F. CIMMYT. 68 p.
- Bates, L. S.; R.P. Waldren; I.D. Teare. 1973.** Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39: 205-207.

- Batey, T. y D. C. McKenzie. 2006.** Soil compaction: identification directly in the field. *Soil Use and Management*, 22: 123-131.
- Bengough, A. G.; C. E. Mullins. 1990.** Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41: 341-358.
- Bengough, A. G.; C. E. Mullins. 1991.** Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. *Plant Soil* 131, 59–66.
- Bergamin, A. C.; A. C. Tadeu; B. Lempp; C. M. A. de Souza; F. R. de Souza. 2010.** Anatomia radicular de milho em solo compactado. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 45 (3): 299-305.
- Berroteran, J. L.; J. A. Zinck. 2000.** Indicadores de la sostenibilidad agrícola nacional cerealera. Caso de estudio: Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 17:139-155.
- Blum, A. 1988.** Plant breeding for stress environments. By CRC Presss, Inc. Florida, p. 43-55.
- Blum, A. 1996.** Constitutive traits affecting plant performance under stress. *In* Proceedings of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize. CIMMYT, México. pp. 131-135.
- Blum, A. 2004.** Drought stress and its impact. http://www.plantstress.com/articles/drought_i/drought_i.htm. Fecha de consulta: 29/10/09.
- Böhm, W. 1979.** Methods of studying root systems. Editorial Springer-Verlag. Berlín. 188p.
- Bohne, K. C.; F. J. Roth; M. Leij; T. van Genuchten. 1993.** Rapid method for estimating the unsaturated hydraulic conductivity from infiltration measurements. *Soil Science*, 155 (4): 237-245.
- Boiffin, J.; G. Monnier. 1985.** Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. In: Procc. of Symposium Assessment of soil surface sealing and crusting. Ghent, Belgium. pp. 210-217.
- Bolaños J.; G. O. Edmeades. 1993a.** Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass, and radiation utilization. *Field Crops Res.*, 31: 233-252.
- Bolaños J.; G. O. Edmeades. 1993b.** Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. II. Responses in reproductive behaviour. *Field Crops Res.*, 31: 253-268.
- Bolaños J.; G. O. Edmeades; L. Martínez. 1993.** Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. III. Responses in drought–adaptive physiological and morphological traits. *Field Crops Res.*, 31: 269-286.

- Bolaños, J.; G. O. Edmeades. 1996.** The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *In Proceedings of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize.* CIMMYT, México. pp. 355-368.
- Boone, F.R., B.W.Veen 1982.** The influence of mechanical resistance and phosphate supply on morphology and function of maize roots. *Neth. J. Agric. Sci.* 30, 179–192.
- Boyer, J. S.; W. K.Silk, 2004.**Hydraulics of plant growth. *Functional Plant Biology*, 31:761-773.
- Boyer, J. S.; M. E. Westgate.2004.** Grain yields with limited water. *J. of Exp. Botany*, 55 (407): 2385-2394.
- Brito, P.; J. de Brito. 1983.** Caracterización agroclimática de los Llanos Occidentales y sus relaciones con el ciclo de maíz. FONAIAP-CENIAP. Maracay. 10 p.
- Bronick, C. J.; R. Lal. 2005.** Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2):3-22.
- Bruckler, L.; F. Lafolie; F. Tardieu. 1991.** Modelling root water potential and soil-root water transport: II Field comparisons. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 1213-1220.
- Buczko, U.; R. O. Kuchenbuch; H. H. Gerke. 2009.** Evaluation of a core sampling scheme to characterize root length density of maize. *Plant Soil*, 31: 205-215.
- Bustamante, W. O.; E. S. Ibarra; H. U. Weiss. 2006.** Programación integral de riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40 (1): 13-25.
- Cabrera, S. R.; P. J. Rodríguez.1996.** Restricción en la producción de maíz a causa de la sequía en Venezuela: Potencial genético para su solución. *In Proceedings of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize.* CIMMYT, México. pp. 58-62.
- Casanova, O. E. 2000.** La fertilización y nutrición mineral del maíz en Venezuela. *In El maíz en Venezuela.* Fundación Polar. Caracas. pp. 275-294.
- Castrillo, M.; D. Fernández; I. Trujillo. 2004.** Respuesta en plantas de maíz ante el estrés hídrico. *Acta Científica Venezolana*, 55: 64-65.
- Coelho, F. E.; D. Or. 1996.**A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 1039-1049.
- Cottenie, A.;M.Verloo;L.Kiekens;G.Velghe;R.Camerlynck1982.**Chemical analysis of plant and soils. Laboratory of Analytical and Agrochemistry, State University of Ghent, Belgium. 63 p.
- Comerma, J. A.; F. Blavia. 1972.** Patrón de distribución de humedad en suelos del Yaracuy medio durante un año. IV Congreso Latinoamericano y IIª Reunión Venezolana de la Ciencia del Suelo. 34p.

- Clark L. J.; W. R. Whalley; P. B. Barraclough. 2003.** How do roots penetrate strong soil?. *Plant and Soil*, 255: 93–104, 2003.
- Climenti, C. A.; J. Cantagallo; E. Guevara. 1996.** Osmotic adjustment in maize: genetic variation and association with water uptake. *In* Proceedings of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize. CIMMYT, México. pp. 200-203.
- Cutler, A. J.; T. M. Squires; M. K. Loewen; J. J. Balsevich. 1997.** Induction of (+)-abscisic acid 8´ hydroxylase by (+)-abscisic acid in cultured maize cells. *J. of Exp. Botany*, 48(315): 1787-1795.
- Dimanche, P.H.; W.B. Hoogmoed. 2002.** Soil tillage and water infiltration in semi-arid Morocco: the role of surface and sub-surface soil conditions. *Soil Till. Res.*, 66: 13-21.
- Della Maggiora, A. I.; A. Irigoyen; J. M. Gardiol; O. Caviglia; L. Echarte. 2002.** Evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 12 (2):167-176.
- Delgado, R.; L. Castro; E. Cabrera de Bisbal; M. J. Mujica; S. Caniche; L. Navarro; I. Noguera. 2008.** Relación entre propiedades físicas del suelo y algunas características del sistema radicular del maíz, cultivado en un suelo Fluventic Haplustoll de textura franco-arenosa de Maracay, Venezuela. *Agronomía Tropical* 58(3):245-255.
- Dexter, A. R. 2004.** Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214.
- Dexter, A. R.; E. A. Czyz; O. P. Gate. 2004.** Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil Till. Res.*, 79: 175–184.
- Díaz-Zorita, M.; J. H. Grove; E. Perfect. 2005.** Soil fragment size distribution and compactive effort effects on maize root seedling elongation in moist soil. *Crop Sci.* 45:1417–1426.
- Du Toit, A. S.; M. A. Prinsloo; B. M. Wafula; P. K. Thornton. 2002.** Incorporating a water-logging routine into CERES-Maize, and some preliminary evaluations. *Water SA*, 28 (3):323-328.
- Durand-Dastes, F. 2012.** Balance hídrico. <http://www.hipergeo.eu/spip.php?article300>. Fecha de consulta: 20/04/2012.
- Earl, H. J.; R. F. Davis. 2003.** Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agron. J.* 95:688–696.
- Edmeades, G.O.; J. Bolaños; R. Lafitte. 1992.** Progress in breeding for drought tolerance in maize. *In* D. Wilkinson (de.) Proceedings of the 47th Ann. corn and sorghum Res. Conf. p: 93-111.

- Edmeades, G.O.; M. Bänziger; S. Pandey; J. Bolaños; S. C. Chapman; A. Ortega; H. R. Lafitte; K. S. Fischer. 1996.** Recurrent selection under managed drought stress improves grain yields in tropical maize. *In* Proceedings of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize. CIMMYT, México. pp. 415-425.
- Edmeades, G.O.; M. Bänziger.1996.** What have we learned and where do we go?.*In* Proceedings of a symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize. CIMMYT, México. pp. 557-563.
- Elings, A. 2000.** Estimation of leaf area in tropical maize. *Agron. J.*, 92:436-444.
- Ewel, J.; A. Madríz; J. Tosi. 1976.** Zonas de Vida de Venezuela. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Ministerio de Agricultura y Cría. FONAIAP. 2da edición. 265 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2013.** Water development and management unit. crop water information: maize. www.fao.org/nr/water/cropinfo_maize.html. fecha de consulta: 17/01/2013.
- Fedeagro. 2009.** Estadísticas nacionales de producción agrícola. <http://www.fedeagro.com.ve> 15. Fecha de consulta 20/05/10.
- Florentino, A. 1989.** Efecto de la compactación sobre las relaciones hídricas en suelos representativos de la Colonia Agrícola de Turén (estado Portuguesa). Su incidencia agronómica. Tesis Doctoral, Postgrado en Ciencia del suelo. Fac. de Agronomía. UCV, Maracay, Venezuela. 207 p.
- Florentino, A. 1998.** Guía para la evaluación de la degradación del suelo y de la sostenibilidad del uso de la tierra: selección de indicadores físicos. Valores críticos. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay, 13 p.
- Fuentes, Y. 1998.** Técnicas de riego. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 410 p.
- Fuentes, Y.; G. García. 1999.** Técnicas de riego. Sistemas de riego en la agricultura. Ediciones Mundi-Prensa. México. 459 p
- Gao, W.; T. Ren; A. G. Bengough; L. Auneau; C. W. Watts; W. R. Whalley. 2012.** Predicting penetrometer resistance from the compression characteristic of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76(2):361-369.
- García M. P. J.; S. Cabrera; A. Pérez; R. Silva; R. Álvarez; C. Marín; P. Monasterio; M. Santella. 2009.** Estabilidad del rendimiento y potencial agronómico de cultivares de maíz de endospermo normal y QPM en zonas agroecológicas de Venezuela. *Agronomía Trop.* 59(4): 433-443.

- Gardner, C. M.; K. B. Laryea; P. W. Unger. 1999.** Soil physical constraints to plant growth and crop production. F.A.O., Rome. pp. 7-41.
- Gee, G.W.; D. Or. 2002.** Particle-size analysis. In: J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4.SSSA.Book Series No. 5.SSSA, Madison, WI. p. 255–293.
- González, E. 2003.**La práctica de agricultura de conservación ayuda a disminuir la compactación y erosión del suelo. Vida Rural. Medio Ambiente. p. 20.
- Grassi, C. J. 1998.** Fundamentos del riego. Serie Riego y Drenaje RD-38. CIDIAT. Venezuela. 409 p.
- Greacen, E. L. 1986.** Root response to soil mechanical properties. Transactions of the 13th Congress of the International Society of Soil Science, 5:20-47.
- GrzesiakM. T. 2009.** Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticale seedlings.*Plant Root*, 3: 10-16.
- Gutierrez, M.; R. San Miguel; A. Larqué-Saavedra. 1996.** Stomatal conductance in successive selection cycles of the drought tolerant maize population ‘Tuxpeño Sequía’. In Proceedings of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize. CIMMYT, México. pp. 212-215.
- Guérif, J.; G. Richard; C. Dürr; J. M. Machet; S. Recous; J. Roger-Estrade. 2001.** A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res.*, 61: 13-32.
- Hatfield, J. L.; T. J. Sauer; J. H. Prueger.2001.** Managing soils to achieve greaterwateruse efficiency. A Review.*Agronomy Journal*, 93:271-280.
- Hamza, M. A.; W. K. Anderson. 2005.** Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions.*Soil Till. Res.*, 82: 121-145.
- Hare, P.; W. Cress; J. Van Staden.1999.** Review article. Proline synthesis and degradation: a model system for elucidating stress-related signal transduction. *J. of Exp. Botany*, 50: 413-434.
- Heanes, D. 1984.** Determination of total organic- C in soil by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure.*Com. Soil Sci. Plant. Anal.*, 15:1191-1213.
- Hillel, D. 1998.** Environmental Soil Physics. Academy press.San Diego. 772 p.
- Hussaini, M.A.; V.B. Ogunlela; A.A. Ramalan; A.M. Falaki.2008.**Mineral composition of dry season maize (*Zea mays*L.) in response to varying levels of nitrogen, phosphorus and irrigation at Kadawa, Nigeria.*World Journal of Agricultural Sciences* 4 (6): 775-780.
- Instituta Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 2012.** Balance hídrico. Red agrometeorológica

INIA.<http://www.agrometeorologia.inia.gob.ve/index.php?option=com..id..>Fecha de consulta: 20/04/2012.

- Jiang, M.;J. Zhang. 2002.** Water stress-induced abscisic acid accumulation triggers the increased generation of reactive oxygen species and up-regulates the activities of antioxidant enzymes in maize leaves. *J. of Exp. Botany*, 53(379): 2401-2410.
- Jin, H.; H. Li; Q. Wang; A. D. McHugh; W. Li; G. Huanwen; N. J. Kuhn. 2007.** The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil Till. Res.*, 94: 493-502.
- Jin, H.; H. Li; R.G. Rasaily; Q. Wang; G. Cai;Y. Su; X. Qiao; L. Liu. 2011.** Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat-maize cropping system in North China Plain. *Soil Till. Res.*, 113(1): 48–54
- Kannan, S. 1978.** Lateral movement of cations in corn leaves. *Plant Physiol.*, 61: 706-707.
- Khedr, A. H; M. A. Abbas; A. A. Wahid; W. P. Quick; G. Abogadallah. 2003.** Proline induces the expression of salt-responsive proteins and may improve the adaptation of *Pancreaticum maritimum* L. to salt-stress. *J. of Exp Botany*, 54(392): 2553-2562.
- Konôpka, B. ; L. Pagès ; C. Doussan. 2009.** Soil compaction modifies morphological characteristics of seminal maize roots. *Plant Soil Environ.*, 55, (1): 1–10.
- Kulli, B; M. Gysi; H. Flühler. 2003.** Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. *Soil Till. Res.*, 70: 29–40.
- Kumar, S.; A. Kadono; R. Lal;W. Dick. 2012.** Long-term no till impacts on organic carbon and properties of two contrasting soils and corn yields in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76(5):1798-1809.
- Kutilek, M. 2004.** Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res.*, 79: 175–184.
- Kutilek, M. 2005.** Unsaturated flow in porous media. College on Soil Physics. Internacional Centre for Theoretical Physics. Italy, 18 p.
- Laborem, G.; M. Wagner; F. Reyes. 1991.** Concentración de prolina como indicador de déficit hídrico en tres patrones de cítricos. *Fruits*, 46 (3), 259-264.
- Lado, M.; A. Paz; M. Ben-Hur. 2004.** Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68 (1):234-242.
- Lafitte, H. R. 2001.** Fisiología del maíz. In *El maíz en los trópicos. Mejoramiento y producción.* FAO, UNESCO, Roma, pp: 29-35.
- Lafolie F.; L. Bruckler; F. Tardieu. 1991.** Modelling root water potential and soil-root water transport: I Model presentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 1203-1212.

- Lal, R. 2001.** Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Develop.*, 12: 516-539.
- Lawrence-Smith, G. H.; S. M. Sinton; S. Carrick; B. E. Clothier; G. D. Buchan; W. Loiskandl. 2012.** Hydraulic properties and the water-conducting porosity as affected by subsurface compaction using tension infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55 (3): 822-831.
- Lipiec, J.; V.V. Medvedev; M. Birkas; E. Dumitru; T.E. Lyndina; S. Rousseva; E. Fulajtár. 2003.** Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *Int. Agrophysics*, 17: 61–69.
- Lobo D.; Z. Lozano; I. Pla. 1996.** Limitaciones físicas para la penetración de raíces de maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L.) en cuatro suelos de Venezuela. *Venezuelos*, 24 (1-2): 19-24.
- Lobo D.; A. Cortez; M. F. Rodríguez; F. Ovalles; J. C Rey; D. Gabriels; R. M. Parra. 2010.** Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. I. Región de los llanos. *Bioagro*, 22(3): 169-176
- Logsdon, S. D.; D. B. Jaynes. 1996.** Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 60(3):703-709.
- Logsdon, S. D.; S. Thomas J.; H-R., Guillermo; H., Jerry L.; K-F., Amy; P., John H. 2010.** Effect of corn or soybean row position on soil water. *Soil Science*: 175 (11): 530-534.
- Lozano, Z.; S. Cabrera; J. Peña; M. Adams. 1997.** Efecto de de los sistemas de labranza sobre dos inceptisoles de los llanos occidentales de Venezuela. II Propiedades físicas de los suelos. *Venezuelos*, 5 (1-2):25-33.
- Lozano, Z.; D. Lobo; I. Pla. 2000.** Diagnóstico de limitaciones físicas en Inceptisoles de los Llanos Occidentales Venezolanos. *Bioagro*, 12 (1): 15-24.
- Ludlow, M. 1987.** [Defining shoot water status in the most meaningful way to relate to physiological processes. In International conference on measurement of soil and plant water status. Utah university. Vol. 2, pp. 47-53.](#)
- Lynch, J. 1995.** Root architecture and plant productivity. *Plant Physiol.*, 109: 7-13.
- Marcano, F; N. Landínez. 1997.** Labranza y sistemas de siembra para la producción del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en un Aquic Ustropepts del estado Yaracuy. *Bioagro*, 9(3): 86-94.
- Marcano, F. 2000.** Experiencias sobre sistemas de labranza en suelos maiceros de Venezuela. . *In El maíz en Venezuela.* Fundación Polar. Caracas. pp. 235-274.
- Materechera, S. A.; A. M. Alston; J. M. Kirby; A. R. Dexter. 1992.** Influence of root diameter on penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, 144: 297-303.

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,75 cm

Eliminado: ¶

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

- Medina, S. 1993.** Comportamiento del maíz en relación a las dosis de nitrógeno, densidad y época de siembra en el estado Guárico. Trabajo de Grado. Postgrado en Agronomía U.C.V. Facultad de Agronomía., Maracay, 266 p.
- Medrano, H.; J. Flexas. 2003.** Respuesta de las plantas al estrés hídrico. *In* La Ecofisiología vegetal: Una ciencia de síntesis. Reigosa, M. J., N. Pedrol y A. Sánchez-Moreiras, (eds). Paraninfo S.A. pp. 253-286.
- Meiri, A.; W. K. Silk; A. Lauchli. 1992.** Growth and deposition of inorganic nutrient elements in developing leaves of *Zea mays* L. *Plant Physiol.* 99, 972-978
- Mehlich, A. 1978.** New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 9(6): 477-492
- Ministerio de Agricultura y Tierras (MAT). 2008.** Patrón de financiamiento de cereales para el ciclo invierno 2008. Costos de producción de maíz. Mimeo. 2p.
- Motavalli P.P.; W.E. Stevens; G. Hartwig. 2003.** Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn N availability by deep tillage and application of poultry manure in a sandy-textured soil. *Soil Till. Res.*, 71: 121-131.
- Mualem, Y. 1976.** A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12:513-522.
- Nacci, S.; I. Pla .1991.** Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. FONAIAP. Serie B, N° 17, Maracay. 40 p.
- Naveed, M; P. Moldrup; M. Tuller, T.P.A. Ferré; K. Kawamoto; T. Komatsu; L. Wollswind; Jonge. 2012.** Prediction of the soil water characteristic from soil particle volume fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76(6):1946-1956.
- Nevens, F.; D. Reheul. 2003.** The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil & Tillage Research* 70:175-184.
- Novák, V.; T. Hortalová; F. Matejka. 2005.** Predicting the effects of soil water content and soil water potential on transpiration of maize. *Agricultural Water Management*, 76: 211-223.
- Núñez, M. C.; E. Cabrera de Bisbal. 2002.** Efecto de la compactación del suelo sobre el transporte de oxígeno dentro del sistema radicular del maíz. *Agronomía Tropical*: 52(3): 197-207.
- Ohep, C.; F. Marcano; L. Rangel. 1994.** Efecto de la labranza sobre algunas características físicas del suelo y la producción de maíz en el Yaracuy medio. *Bioagro*, 6 (3): 77-96.

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

- Ovalles, F. A. 1991.** Evaluación de la variabilidad de suelos a nivel de parcela, para el establecimiento en lotes experimentales en el estado Cojedes. *Agronomía Tropical*, 41(1-2):5-21.
- Page, A. L. 1982.** Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and mineralogical properties. Second edition. American Society of America. Inc. Publisher. USA. 1159 p.
- Pagliai, M.; N. Vignozzi; S. Pellegrini. 2004.** Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till. Res.*, 79(2): 131-143.
- Pagliai, M.; N. Vignozzi. 2002.** The soil pore system as an indicator of soil quality. *Adv. GeoEcology*, 35: 69-80.
- Paliwal R. L. 2001.** Mejoramiento del maíz híbrido. In El maíz en los trópicos. Mejoramiento y producción. FAO, UNESCO, Roma, http://www.fao.org/docrep/003/X7650S/x7650s16.htm#P0_0. Fecha de consulta: 15/03/2009.
- Patil, S.L; M.N. Sheelavantar. 2004.** Effect of cultural practices on soil properties, moisture conservation and grain yield of winter sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in semi-arid tropics of India. *Agricultural Water Management*, 64: 49–67.
- Pearce, R. B.; J. H. Mock; T. B. Bailey, 1975.** Rapid method for estimating leaf area per plant in maize. *Crop Sci.*, 15:691-694.
- Pietola, L. M. 2005.** Root growth dynamics of spring cereals with discontinuation of mouldboard ploughing. *Soil Till. Res.*, 80:103-114.
- Pla, I. 1983.** Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Rev. Fac. Agron.* Alcance N° 32. 91p.
- Pulido-Moncada, M.; D. Lobo-Lujan; Lozano-Pérez, Z. 2009.** Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia*, 43(3): 221-230.
- Quiroga, A. R.; D. E. Buschiazzi; N. Peinemann. 1999.** Soil Compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Till. Res.*, 52:21-28.
- Raymond, M. J.; N. Smirnof. 2002.** Proline metabolism and transport in maize seedlings at low water potential. *Annals of Botany*, 89: 813-823.
- Raza W.; S. Yousaf; A. Niaz; M. K. Rasheed; I. Hussain. 2005.** Subsoil compaction effects on soil properties, nutrient uptake and yield of maize fodder (*Zea mays* L.) *Pak. J. Bot.*, 37(4): 933-940.

- Rodríguez, P. J. 2000.** Aspectos climatológicos relacionados con la producción comercial de maíz. *In: El maíz en Venezuela.* Fundación Polar. Caracas. pp. 61-75.
- Ribaut, J.M; D. González de León; C. Jiang; G.O. Edmeades; D.A. Hoisington. 2004.** Identification and transfer of ASI quantitative trait loci (QTL): A strategy to improve drought tolerance in maize lines and populations. *In Proceedings of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize.* CIMMYT, México. pp. 396-400.
- Riccelli, M. 2000.** Estrategias para el mejoramiento genético del maíz en el trópico. *In: El maíz en Venezuela.* Fundación Polar. Caracas. pp. 149-154.
- Ritchie, S.;J. J. Hanway; G. O. Benson. 1992.** How a corn plant develops. Special Report N° 48. IASTATE, Iowa, 19 p. <http://www.extension.iastate.edu/publications/SR48.html> Fecha de consulta, 26/03/04.
- Rivetti, A. R. 2006.** Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Rev. FCA UNCuyo.* Tomo XXXVIII. N° 2. pp. 25-36.
- Rondón, C.; G. Elizalde. 1997.** Estabilidad física y química de los microagregados de dos unidades de suelos evolucionados. *Agronomía Trop.*, 47(4): 409-423.
- Ruiz, D. M. 1995.** Caracterización de la materia orgánica asociada a microagregados de suelos de dos toposecuencias ubicadas en el estado Guárico. Trabajo de Grado. Postgrado en Ciencia del Suelo. Maracay, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 200 p.
- Sairam, R. K.; S. D. Dube. 1984.** Effect of moisture stress on proline accumulation in wheat in relation to drought tolerance. *Indian J. Agric. Sci.*, 54 (2): 146-147.
- San Vicente, F.; S. K. Vasal; S. D. Mc Lean; S. K. Ramanujam; M. Barandiaran. 1999.** Comportamiento de líneas tropicales precoces de maíz en condiciones de sequía. *Agronomía Tropical*, 49 (2): 135-152.
- Setter, T. L.; B. A. Flannigan; J. Melkonian. 2001.** Loss of kernel set due to water deficit and shade in maize. *Crop Sci.* 41:1530-1540.
- Soil Science Society of America. 2006.** Glossary of soil science terms. <https://www.soils.org/publications/soil-glossary#>.
- Schmalz, B.; B. Lennartz; M. T. Van Genuchten.2003.** Analysis of unsaturated water flow in a large sand tank. *Soil Sci.*, 168 (1): 3-14.
- Sobrado, M. A. 1986.** Tissue water relations and leaf growth of tropical corn cultivars under water deficits. *Plant, Cell and Environment*, 9: 451-457.

- SOCODEC-VENEZUELA. 2002.** Estudio de suelos con fines de riego Río Tiznados. Informe final. Caracas. 62 p.
- Smith, S. F.; K. R. Baye; E. E. Gbur; P. Chen; K. Korth. 2014.** Residue and water management effects on aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in a wheat-soybean double crop system. *Sci. Soc. Am. J.*, 78 (4):1378-1391.
- Sokolov, A. A.; T. C. Chapman, 1981.** Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. Instituto de Hidrología de España /Unesco. 191 p.
- Spoor, G. 2006.** Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil and Use Management*, 22:113-122.
- Steel, R.G. D.; J. H. Torrie 1980.** Bioestadística. Principios y Procedimientos. McGraw-Hill. 2da edición. México, 622 p.
- Stewart, C. R.; S. F. Boggess; D. Aspinal; L. G. Paleg. 1977.** Inhibition of proline oxidation by water stress. *Plant. Physiol.*, 59: 930-932.
- Stewart, D. W.; L. M. Dwyer, 1999.** Mathematical characterization of leaf shape and area of maize hybrid. *Crop Sci.*, 39:422-427.
- Strebin, S.; Perez, M. R.; Dumith, D. 1967.** Estudio agrológico semidetallado Valle Río Tiznados. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Obras Hidráulicas. División de Edafología. Oficina Agrológica Central. Turmero, estado Aragua. 83 p.
- Taboada, M. A.; C. R. Álvarez. 2008.** Root abundance of maize in conventionally-tilled and zero-tilled soils of Argentina. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:769-779,
- Tardieu, F. 1994.** Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signalling?. *Soil Till. Res.* 30: 217-243.
- Tardieu, F.; B. Muller; M. Reymond; W. Saduk; T. H. Simonneay. 2004.** Controls of leaf growth and stomatal conductance under water deficit: combining genetic and ecophysiological analyses. In Resilient Crops for Water Limited Environments: Proceedings of a Workshop Held at Cuernavaca, Mexico. pp. 200-201.
- Tekwa, I. J.; E. K. Bwade. 2011.** Estimation of irrigation water requirement of maize (*Zeamays*) using pan evaporation method in Maiduguri, Northeastern Nigeria. *Agricultural Engineering International: the CIGR journal*. Manuscript Ni 1552. 13 (1): 1-7.
- Tolk, J.; S. Evett. 2012.** Lower limits of crop water use in three soil textural classes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76(2):607-616.

- Tubeileh A. ; V. Groleau-Renaud ; S. Plantureux ; A. Guckert. 2003.** Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize–soil system. *Soil Till. Res.*, 71: 151–161.
- Universidad Central de Venezuela (UCV) 1993.** Cuadernos de Agronomía N° 6, Año 1. Maracay. Instituto de Edafología. 89p.
- Unger, P. W.; T. C. Kaspar.1994.** Soil compaction and root growth: A Review. *Agron. J.* 86:759-766.
- Unger, P. W.; O. R. Jones; K. B. Larrea.1995.** Sistemas de labranza y prácticas de manejo de suelo para diferentes condiciones de tierras y climas. *In* Memorias de la Segunda Reunión de la Red Latinoamericana de Labranza Conservacionista. FONAIAP, FAO, ISSS-AISS-IBG, UNELLEZ, RELACO. Guanare-Acarigua, Portuguesa, Venezuela. pp 82-117.
- Van Genuchten, M. 1980.** A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898.
- Viarural. 2012.** Manual técnico del maíz. agua y riego. www.viarural.com.ar/...com.../manualmaiz/manualmaizcargill44.htm.
- Waldren R. P.; I. D. Teare. 1974.** Free proline accumulation in drought-stressed plants under laboratory conditions. *Plant and Soil*, 40: 689-692.
- Westgate, M. E. 1996.** Physiology of flowering in maize: Identifying avenues to improve kernel set during drought. Developing drought- and low N- tolerant maize. *In* Procc.of a Symposium: Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize. CIMMYT, México. pp 136-141.
- Whalley, W. R.; P. B. Leeds-Harrison; L.J. Clark; D. J. G. Gowing.2005.** Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 84:18-27.
- Whiteley, G. M.; W. H. Utomo; A. R. Dexter. 1981.** A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. *Plant and Soil*, 61:351-364.
- Wilkinson , S.; W. J. Davies. 2002.** ABA-based chemical signalling: the co-ordination of responses to stress in plants. *Plant, Cell and Environment*, 25: 195-210.
- Xiping, D.; S. Lun; I. Shinobu.2002.** Assessments on the water conservation practices and wheat adaptations to the semiarid and eroded environments. 12th ISCO Conference. Beijing. pp. 348-360.

- Yi, L.; Y. Shenjiao, L. Shiqing; C. Xinping; C. Fang. 2010.** Growth and development of maize (*Zea mays* L.) in response to different field water management practices: resource capture and use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 150: 606-613.
- Young, I. M.; K. Montagu; J. Conroy; A. G. Bengough. 1997.** Mechanical impedance of root growth directly reduces leaf elongation rates of cereals. *New Phytol.*, 135: 613-619.
- Yusuf, D. D. 2006.** Effect of variation in tillage systems on maize (*Zea mays* L.) establishment and grain yield in a semi-arid tropical climate. *J. Agric. Sci. Technol.*: 8: 171-179.
- Zwart, S. J.; W. G. M. Bastiaanssen . 2004.** Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69: 115–133.

8. ANEXOS

8.1. Resultados de los análisis de varianza

a) Cuadro para Contenido de humedad, 32 dds (%0) capa 0-12 cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	69.292	34.646		
SUPLAGUA (B)	1	247.521	247.521	16.08	0.0569
Error A*B	2	30.792	15.396		
TPS (C)	1	0.188	0.188	0.04	0.8585
B*C	1	180.187	180.187	34.73	<u>0.0041</u>
Error A*B*C	4	20.750	5.188		
GENOTIPO (D)	3	5.229	1.743	0.22	0.8839
B*D	3	5.063	1.6880.21	0.8887	
C*D	3	17.729	5.9100.73	0.5418	
B*C*D	3	59.06319.688	2.45	0.0884	
Error A*B*C*D24	193.167	8.049			
Total	47	828.979			

Media general:12.354

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 31.76

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 18.44

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 22.96

b) Cuadro para Contenido de humedad, 35 dds(%0) capa 0-12 cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	130.667	65.333		
SUPLAGUA (B)	1	133.333	133.333	23.88	<u>0.0394</u>
Error A*B	2	11.167	5.583		
TPS (C)	1	5.333	5.333	1.00	0.3739
B*C	1	102.083	102.083	19.14	<u>0.0119</u>
Error A*B*C	4	21.333	5.333		
GENOTIPO (D)	3	10.250	3.417	0.72	0.5508
B*D	3	3.000	1.000	0.21	0.8883
C*D	3	29.667	9.889	2.08	0.1296
B*C*D	3	16.917	5.639	1.19	0.3362
Error A*B*C*D	24	114.167	4.757		
Total	47	577.917			

Media general: 12.292

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 19.22

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 18.79

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 17.74

c) Cuadro para Contenido de humedad, 48 dds(%0) capa 0-12 cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	16.792	8.3958		
SUPLAGUA (B)	1	93.521	93.5208	7.25	0.1147
Error A*B	2	25.792	12.8958		
TPS (C)	1	1.687	1.6875	0.20	0.6800
B*C	1	42.188	42.1875	4.93	0.0906
Error A*B*C	4	34.250	8.5625		
GENOTIPO (D)	3	6.396	2.1319	0.91	0.4530
B*D	3	9.729	3.2431	1.38	0.2736
C*D	3	38.896	12.9653	5.51	<u>0.0050</u>
B*C*D	3	34.729	11.5764	4.92	0.0084
Error A*B*C*D	24	56.500	2.3542		
Total	47	360.479			

Grand Mean 8.1042

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 44.31

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 36.11

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 18.93

d) Cuadro para Contenido de humedad, 32 dds (%0)capa 12-20 cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	6.542	3.271		
SUPLAGUA (B)1	18.750	18.750	0.29	0.6430	
Error A*B	2	128.375	64.188		
TPS (C)	1	8.333	8.333	0.55	0.5011
B*C	1	184.083	184.083	12.05	<u>0.0255</u>
Error A*B*C	4	61.083	15.271		
GENOTIPO (D)	3	22.500	7.500	0.51	0.6776
B*D	3	56.417	18.806	1.28	0.3023
C*D	3	36.167	12.056	0.82	0.4938
B*C*D	3	81.083	27.028	1.85	0.1658
Error A*B*C*D	24	351.333	14.639		
Total	47	954.667			

Grand Mean 14.167

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 56.55

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 27.58

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 27.01

e) Cuadro para Contenido de humedad, 35 dds (%0) capa 12-20cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	45.542	22.7708		
SUPLAGUA (B)	1	6.750	6.7500	0.26	0.6585
Error A*B	2	51.125	25.5625		
TPS (C)	1	52.083	52.0833	1.95	0.2351
B*C	1	16.333	16.3333	0.61	0.4779
Error A*B*C	4	106.833	26.7083		
GENOTIPO (D)	3	8.000	2.6667	0.49	0.6939
B*D	3	20.917	6.9722	1.28	0.3052
C*D	3	62.917	20.9722	3.84	<u>0.0224</u>
B*C*D	3	4.000	1.3333	0.24	0.8648
Error A*B*C*D	24	131.167	5.4653		
Total	47	505.667			

Grand Mean 11.083

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 45.62

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 46.63

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 21.09

f) Cuadro para Contenido de humedad, 48 dds (%0) capa 12-20cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	43.875	21.9375		
SUPLAGUA (B)	1	35.021	35.0208	1.73	0.3192
Error A*B	2	40.542	20.2708		
TPS (C)	1	0.188	0.1875	0.05	0.8362
B*C	1	17.521	17.5208	4.55	0.1000
Error A*B*C	4	15.417	3.8542		
GENOTIPO (D)	3	8.563	2.8542	0.32	0.8130
B*D	3	1.063	0.3542	0.04	0.9893
C*D	3	46.562	15.5208	1.72	0.1889
B*C*D	3	27.896	9.2986	1.03	0.3960
Error A*B*C*D	24	216.167	9.0069		
Total	47	452.813			

Grand Mean 8.9375

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 50.38

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 21.97

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 33.58

g) Cuadro para Contenido de humedad, 32 dds (%θ) capa 20-30 cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	39.54	19.771		
SUPLAGUA (B)1	105.02	105.021	0.85	0.4536	
Error A*B	2	246.79	123.396		
TPS (C)	1	17.52	17.521	26.28	<u>0.0069</u>
B*C	1	346.69	346.688	520.03	<u>0.0000</u>
Error A*B*C	4	2.67	0.667		
GENOTIPO (D)	3	68.56	22.854	1.42	0.2621
B*D	3	6.06	2.021	0.13	0.9442
C*D	3	51.90	17.299	1.07	0.3793
B*C*D	3	2.73	0.910	0.06	0.9820
Error A*B*C*D	24	387.00	16.125		
Total	47	1274.48			

Grand Mean 14.771

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 75.20

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 5.53

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 27.19

h) Cuadro para Contenido de humedad, 35 dds (%θ) capa 20-30 cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	48.292	24.1458		
SUPLAGUA (B)	1	2.083	2.0833	0.03	0.8742
Error A*B	2	129.542	64.7708		
TPS (C)	1	21.333	21.3333	1.23	0.3289
B*C	1	60.750	60.7500	3.51	0.1342
Error A*B*C	4	69.167	17.2917		
GENOTIPO (D)	3	43.667	14.5556	1.23	0.3190
B*D	3	60.917	20.3056	1.72	0.1892
C*D	3	3.333	1.1111	0.09	0.9625
B*C*D	3	57.583	19.1944	1.63	0.2092
Error A*B*C*D	24	283.000	11.7917		
Total	47	779.667			

Grand Mean 13.083

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 61.51

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 31.78

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 26.25

i) Cuadro para Contenido de humedad, 48 dds (%θ) capa 20-30 cm

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	33.042	16.5208		
SUPLAGUA (B)	1	1.688	1.6875	0.05	0.8414
Error A*B	2	65.375	32.6875		
TPS (C)	1	13.021	13.0208	0.94	0.3872
B*C	1	54.188	54.1875	3.91	0.1191
Error A*B*C	4	55.417	13.8542		
GENOTIPO (D)	3	32.729	10.9097	1.25	0.3124
B*D	3	2.729	0.9097	0.10	0.9566
C*D	3	95.729	31.9097	3.67	<u>0.0263</u>
B*C*D	3	11.229	3.7431	0.43	0.7333
Error A*B*C*D	24	208.833	8.7014		
Total	47	573.979			

Grand Mean 9.4792

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 60.31

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 39.27

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 31.12

j) Cuadro para la variable rendimiento

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	4018649	2009324		
SUPLAGUA (B)	1	2427526	2427526	27.81	<u>0.0341</u>
Error A*B	2	174566	87283		
TPS (C)	1	256303	256303	1.22	0.3309
B*C	1	15866.8	15867	0.08	0.7969
Error A*B*C	4	838511	209628		
GENOTIPO (D)	3	1215811	405270	0.85	0.4790
B*D	3	1800083600028	1.26	0.3096	
C*D	3	1700013566671	1.19	0.3338	
B*C*D	3	933773311258	0.65	0.5878	
Error A*B*C*D	24	1.140E+07	475337		
Total		472.479E+07			

Media general: 3883.9

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 7.61

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 11.79

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 17.75

k) Cuadro para ASI

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	0.6667	0.3333		
SUPLAGUA (B)	1	18.7500	18.7500	18.75	<u>0.0494</u>
Error A*B	2	2.0000	1.0000		
TPS (C)	1	2.0833	2.0833	1.56	0.2794
B*C	1	8.3333	8.3333	6.25	0.0668
Error A*B*C	4	5.3333	1.3333		
GENOTIPO (D)	3	9.1667	3.0556	3.55	<u>0.0295</u>
B*D	3	5.7500	1.9167	2.23	<u>0.1111</u>
C*D	3	2.4167	0.8056	0.94	0.4389
B*C*D	3	7.5000	2.5000	2.90	0.0556
Error A*B*C*D	24	20.6667	0.8611		
Total	47	82.6667			

Media general: 3.8333

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 26.09

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 30.12

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 24.21

l) Cuadro para IAF total

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	0.66226	0.33113		
SUPLAGUA (B)	1	0.63480	0.63480	89.33	<u>0.0110</u>
Error A*B	2	0.01421	0.00711		
TPS (C)	1	0.51253	0.51253	2.08	0.2227
B*C	1	0.18750	0.18750	0.76	0.4323
Error A*B*C	4	0.98579	0.24645		
GENOTIPO (D)	3	0.53698	0.17899	1.89	0.1575
B*D	3	0.31482	0.10494	1.11	0.3642
C*D	3	0.29542	0.09847	1.04	0.3918
B*C*D	3	0.11662	0.03887	0.41	0.7463
Error A*B*C*D	24	2.26747	0.09448		
Total	47	6.52840			

Media general: 2.0550

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 4.10

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 24.16

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 14.96

m) Cuadro para IAF Verde

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	0.38078	0.19039		
SUPLAGUA (B)	1	0.32341	0.32341	96.84	<u>0.0102</u>
Error A*B	2	0.00668	0.00334		
TPS (C)	1	0.33333	0.33333	2.36	0.1989
B*C	1	0.14301	0.14301	1.01	0.3708
Error A*B*C	4	0.56391	0.14098		
GENOTIPO (D)	3	0.28272	0.09424	1.84	0.1665
B*D	3	0.13827	0.04609	0.90	0.4551
C*D	3	0.14862	0.04954	0.97	0.4238
B*C*D	3	0.06144	0.02048	0.40	0.7540
Error A*B*C*D	24	1.22770	0.05115		
Total	47	3.60987			

Media general: 1.5733

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 3.67

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 23.86

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 14.38

n) Cuadro para biomasa aérea en plantas jóvenes

Source	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	241.17	120.583		
SUPLAGUA (B)	1	221.02	221.021	106.09	<u>0.0093</u>
Error A*B	2	4.17	2.083		
TPS (C)	1	825.02	825.021	26.33	<u>0.0068</u>
B*C	1	88.02	88.021	2.81	<u>0.1690</u>
Error A*B*C	4	125.33	31.333		
GENOTIPO (D)	3	83.23	27.743	0.76	0.5291
B*D	3	504.40	168.132	4.59	<u>0.0112</u>
C*D	3	53.06	17.688	0.48	<u>0.6974</u>
B*C*D	3	307.73	102.576	2.80	0.0617
Error A*B*C*D	24	879.33	36.639		
Total	47	3332.48			

Grand Mean 20.229

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 7.14

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 27.67

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 29.92

o) Cuadro para Biomasa aérea (98 dds)

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	3.420	1.710		
SUPLAGUA(B)	1	123.200	123.200	51.26	<u>0.0190</u>
Error A*B	2	4.807	2.403		
TPS (C)	1	38.342	38.342	26.58	<u>0.0067</u>
B*C	1	0.002	0.002	0.00	0.9730
Error A*B*C	4	5.770	1.442		
GENOTIPO (D)	3	14.256	4.752	3.22	<u>0.0404</u>
B*D	3	33.222	11.074	7.51	<u>0.0010</u>
C*D	3	16.144	5.381	3.65	<u>0.0267</u>
B*C*D	3	66.127	22.042	14.95	<u>0.0000</u>
Error A*B*C*D	24	35.383	1.474		
Total	47	340.673			

Media general: 8.7188

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 17.78

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 13.78

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 13.93

p) Cuadro para peso seco de raíces 45 dds

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	6.3136	3.1568		
SUPLAGUA (B)	1	0.8190	0.8190	1.23	0.3834
Error A*B	2	1.3350	0.6675		
TPS (C)	1	20.3451	20.3451	24.90	<u>0.0075</u>
B*C	1	3.0755	3.0755	3.76	<u>0.1244</u>
Error A*B*C	4	3.2687	0.8172		
GENOTIPO (D)	3	6.9474	2.3158	1.96	0.1467
B*D	3	2.4727	0.8242	0.70	0.5624
C*D	3	3.7882	1.2627	1.07	0.3806
B*C*D	3	5.4731	1.8244	1.55	0.2286
Error A*B*C*D	24	28.3360	1.1807		
Total	47	82.1743			

Media general: 2.5065

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 32.60

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 36.07

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 43.35

q) Cuadro para Peso seco de raíces 98 dds

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	585.07	292.535		
SUPLAGUA (B)	1	287.83	287.826	4.39	0.1712
Error A*B	2	131.20	65.600		
TPS (C)	1	2.06	2.058	0.60	0.4824
B*C	1	24.28	24.282	7.06	0.0566
Error A*B*C	4	13.76	3.440		
GENOTIPO (D)	3	55.05	18.351	0.86	0.4776
B*D	3	88.28	29.426	1.37	0.2754
C*D	3	29.39	9.798	0.46	0.7151
B*C*D	3	322.45	107.483	5.01	0.0077
Error A*B*C*D	24	514.93	21.456		
Total	47	2054.30			

Media general: 15.135

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 53.51

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 12.25

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 30.60

r) Cuadro para Índice de Cosecha (IC)

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	134.66	67.328		
SUPLAGUA (B)	1	25.67	25.667	1.49	0.3460
Error A*B	2	34.34	17.172		
TPS (C)	1	151.59	151.585	5.90	0.0720
B*C	1	1.96	1.960	0.08	0.7960
Error A*B*C	4	102.70	25.675		
GENOTIPO (D)	3	157.54	52.514	2.62	0.0741
B*D	3	373.67	124.556	6.21	<u>0.0028</u>
C*D	3	119.06	39.687	1.98	<u>0.1441</u>
B*C*D	3	196.43	65.477	3.26	0.0388
Error A*B*C*D	24	481.37	20.057		
Total	47	1778.98			

Media general: 45.769

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 9.05

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 11.07

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 9.79

s) Cuadro para Altura de Planta

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	0.16865	0.08432		
SUPLAGUA (B)	1	0.09275	0.09275	5.69	0.1399
Error A*B	2	0.03262	0.01631		
TPS (C)	1	0.18875	0.18875	5.51	0.0788
B*C	1	0.01050	0.01050	0.31	0.6094
Error A*B*C	4	0.13708	0.03427		
GENOTIPO (D)	3	0.94707	0.31569	22.85	0.0000
B*D	3	0.05739	0.01913	1.38	0.2715
C*D	3	0.00962	0.00321	0.23	0.8731
B*C*D	3	0.08351	0.02784	2.01	0.1387
Error A*B*C*D	24	0.33158	0.01382		
Total	47	2.05953			

Media general: 1.5581

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 8.20

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 11.88

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 7.54

t) Cuadro para Altura de Mazorca

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	0.07082	0.03541		
SUPLAGUA (B)	1	0.09810	0.09810	32.61	0.0293
Error A*B	2	0.00602	0.00301		
TPS (C)	1	0.04750	0.04750	2.16	0.2153
B*C	1	0.01725	0.01725	0.79	0.4255
Error A*B*C	4	0.08783	0.02196		
GENOTIPO (D)	3	0.45862	0.15287	30.37	0.0000
B*D	3	0.01409	0.00470	0.93	0.4400
C*D	3	0.01019	0.00340	0.67	0.5759
B*C*D	3	0.03367	0.01122	2.23	0.1107
Error A*B*C*D	24	0.12080	0.00503		
Total	47	0.96490			

Media general: 0.6265

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 8.76

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 23.65

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 11.32

u) Cuadro para CALCIO foliar

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	0.187	0.0933		
SUPLAGUA (B)	1	1.387	1.3872	3.21	0.2153
Error A*B	2	0.866	0.4328		
TPS (C)	1	14.874	14.8741	18.82	<u>0.0123</u>
B*C	1	1.092	1.0920	1.38	0.3050
Error A*B*C	4	3.161	0.7903		
GENOTIPO (D)	3	5.179	1.7265	0.66	0.5829
B*D	3	3.541	1.1804	0.45	0.7174
C*D	3	10.779	3.5930	1.38	0.2729
B*C*D	3	4.233	1.4111	0.54	0.6583
Error A*B*C*D	24	62.498	2.6041		
Total	47	107.798			

Media general: 9.3700

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 7.02

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 9.49

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 17.22

v) Cuadro para HIERRO foliar

Fuente	DF	SS	MS	F	P
BLOQUE (A)	2	2232	1116.06		
SUPLAGUA (B)	1	2955	2954.90	29.94	<u>0.0318</u>
Error A*B	2	197	98.70		
TPS (C)	1	1531	1530.81	1.78	0.2531
B*C	1	4922	4921.76	5.72	0.0750
Error A*B*C	4	3441	860.16		
GENOTIPO (D)	3	12781	4260.31	2.07	0.1306
B*D	3	16805	5601.83	2.72	0.0666
C*D	3	867	288.95	0.14	0.9347
B*C*D	3	17269	5756.19	2.80	0.0617
Error A*B*C*D	24	49357	2056.54		
Total	47	112356			

Media general: 90.906

CV(BLOQUE*SUPLAGUA) 10.93

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS) 32.26

CV(BLOQUE*SUPLAGUA*TPS*GENOTIPO) 49.89

SUPLAGUA = Tratamiento de suplencia de agua

TPS = Tratamiento de preparación de suelo

GENOTIPO = Tratamiento de genotipo

CV = Coeficiente de variación

8.2 Fotos



Implemento usado para subsolar el suelo



Toma de muestras de suelo



Riego por surcos



Colocación de la semilla



Emergencia de plántulas



Aspecto general del cultivo



Sistema radical de plantas a los 45dds para los genotipos C_2 y C_3 .



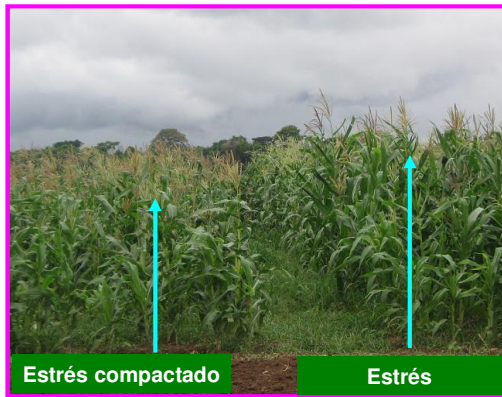
Aspecto en plantas a los 45 dds., para los genotipos C_2 y C_3 en tratamientos de preparación de suelo (A: compactado y B: subsolado) bajo el tratamiento de estrés.



Aspecto de las plantas a lo 98 dds.



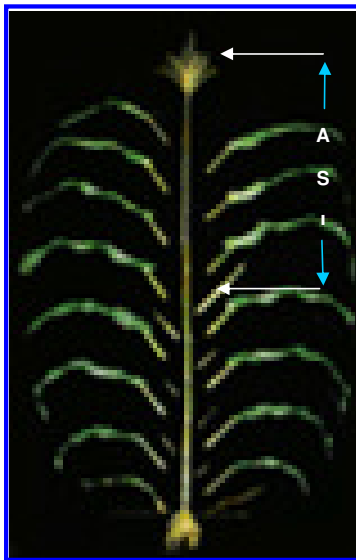
Vista de las plantas por genotipo (C₁, C₂, C₃ y C₄)



Vista general de las plantas en tratamientos de estrés-preparación de suelo



Aspecto de la liberación de pólen.



ingles)

Vista general de las plantas en etapa



llenado de grano

Inter
valo
Anté
sis-
Esti
gma
(ASI
en

de



Enrollamiento de hojas en C₁

Tratamiento : subsolado – estrés hídrico

Vista del genotipo C₁(45 dds.), mostrando el C₃ enrollamiento de las hojas.



Crecimiento de raíces laterales en genotipo

Página 48: [1] Con formato **Flia. Romero Rondon** **24/06/2015 13:41:00**

Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Página 48: [2] Con formato **Flia. Romero Rondon** **24/06/2015 13:41:00**

Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Página 48: [3] Con formato **Flia. Romero Rondon** **24/06/2015 13:41:00**

Justificado, Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Página 48: [4] Con formato **Flia. Romero Rondon** **24/06/2015 13:41:00**

Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 0,63 cm, Espacio Antes: 6 pto

Página 109: [5] Eliminado **Flia. Romero Rondon** **02/07/2015 17:03:00**

Cuadro 21. Valores promedio del peso seco de los diferentes órganos y su proporción relativa (%) en la planta a los 98 dds, para los tratamientos de suplencia de agua. Letras distintas por columna muestran diferencias significativas ($\alpha = 5\%$).

Página 109: [6] Con formato **Flia. Romero Rondon** **02/07/2015 17:04:00**

Justificado, Sangría: Izquierda: 0 cm, Sangría francesa: 1,9 cm, Espacio Después: 6 pto,
Interlineado: sencillo

Página 109: [7] Con formato **Flia. Romero Rondon** **25/06/2015 19:48:00**

Fuente: 10 pto, Sin Cursiva