

PARAMETROS FISIOTECNICOS DE EFICIENCIA Y
PRODUCTIVIDAD DE NOPAL VERDURA (Opuntia spp)
BAJO CONDICIONES DE PRODUCCION INTENSIVA

BERNARDO MURILLO AMADOR

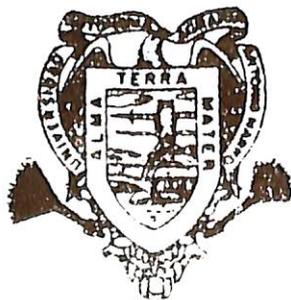
Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



T E S I S

B I B L I O T E C A

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN FITOMEJORAMIENTO



**Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro**

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

MARZO DE 1996

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito parcial, para optar al grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

COMITE PARTICULAR



Asesor Principal:

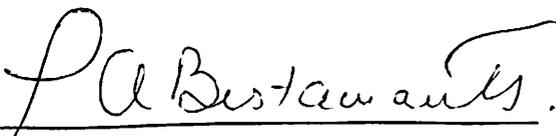
M.C. Fernando Borrego Escalante

Asesor:



Dr. Alfonso López Benitez

Asesor:



M. Sc. Leticia Bustamante García

Dr. Jesús Manuel Fuentes Rodríguez
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Marzo de 1996

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Al Patronato del Estudiante Sudcaliforniano y al personal que labora en el mismo, especialmente a la Sra. Josefina Cota.

A mis asesores, M.C. Fernando Borrego E.; Dr. Alfonso López B.; y MSc. Leticia Bustamante García.

Al M.C. Victor Zamora Villa y Dr. Sergio A. Rodríguez Herrera; Profesores-Investigadores de la UAAAN.

De manera especial a la Biol. Ana María Ochoa y Q.F.B. Luz María Acosta.

Al personal de apoyo de la Subdirección de Postgrado de la UAAAN.

A mis compañeros, Ing. Narciso Avila; Ing. Francisco Ruiz; Ing. Hector Rios; Ing. Roberto H. Pargas; Ing. Santos González; Ing. Cristina Ruiz; Ing. Martin Romero; Ing. Armando de León.

A los Profesores-Investigadores y personal administrativo de Ciencias Agrop. de la UABCS; Elba; Paty; Lupita; Jorge; Oscar R. José Cabrera; José; Ing. Homero Fraga M.; Ing. Roberto Pargas L.; M.C. Arturo Escobar H.; M.C. Sergio Zamora S.; Ing. Juan de Dios Duarte O.; Ing. Liborio Fenech L. ; Ing. Manuel de J. Luna C.; M.C. Rafael de Luna de la P.; Ing. Alfredo Beltrán M.; Ing. Erick Cisneros B.; Raúl Murillo y el personal del Campo Agropecuario.

DEDICATORIA

A MI PODER SUPERIOR

A MI FAMILIA

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS

COMPENDIO

PARAMETROS FISIOTECNICOS DE EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DE
NOPAL VERDURA (*Opuntia spp*) BAJO CONDICIONES DE PRODUCCION
INTENSIVA

POR

BERNARDO MURILLO AMADOR

MAESTRIA

FITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO. MARZO DE 1996

M.C. Fernando Borrego Escalante -Asesor-

Palabras clave: nopal, parámetros fisiotécnicos, eficiencia, productividad,
producción intensiva.

Este trabajo de investigación tuvo como objetivos: (a) determinar parámetros fisiotécnicos de eficiencia y productividad, bajo condiciones de semi-forzado en túneles de polietileno, (b) encontrar el sistema de producción

más adecuado, considerando los factores: fertilización, densidad y genotipos en condiciones de semi-forzado en túneles de polietileno, (c) realizar correlaciones fenotípicas entre los parámetros fisiotécnicos en estudio: Peso Seco (PS), Índice de Crecimiento del Cultivo (ICC), Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC), Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), Índice de Área Foliar (IAF) y Tasa de Asimilación Neta, (d) determinar mediante análisis de senderos los parámetros que mejor explican el comportamiento de la eficiencia fotosintética (TAN) de los genotipos en estudio. La investigación se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones considerando los genotipos de nopal: AN-V1, AN-V3, AN-V5 y AN-TV6, en dos niveles de fertilización orgánica (estiércol bovino), alta y baja con 16 y 8 cm de espesor de estiércol, respectivamente y cinco densidades de plantación: 10, 20, 30, 40 y 50 plantas/m². Las variables medidas fueron producción de brotes, peso seco de brotes y número de brotes, además los parámetros fisiotécnicos: ICC, TCC, TRC, IAF y TAN.

Los resultados revelan que las variables producción, peso seco y número de brotes, presentaron comportamiento superior en la densidad de 20 plantas/m² y estadísticamente en las densidades de 10 y 30 plantas/m², siendo los mejores genotipos para estas variables el AN-TV6 y AN-V1; además este último se presentó como el de mayor eficiencia fotosintética en la densidad de 30 plantas/m² y estadísticamente el AN-TV6 en las densidades de 40 y 50 plantas/m²

. Los mayores ICC y TCC se presentaron en el nivel de fertilización alta, mientras que AN-V3 y AN-V5, tuvieron mayores TCC. Los mejores IAF, los presentaron los genotipos AN-V3 y AN-v5, con 50 plantas/m² . La interacción de los tres factores fue significativa solo para TRC, donde AN-V1 y AN-V3 con 40 plantas/m² con niveles de fertilización alta y baja, respectivamente, se presentaron como las mejores interacciones. En general, los parámetros considerados en el presente estudio presentaron correlaciones altas y positivas con la TAN y resultaron ser buenos indicadores que permiten explicar la eficiencia fotosintética de los genotipos a través de la misma.

ABSTRACT

PHYSIOLOGICAL TRAITS OF EFFICIENCY AND PRODUCTIVITY OF
Opuntia spp VEGETABLE UNDER INTENSIVE PRODUCTION
CONDITIONS

BY

BERNARDO MURILLO AMADOR

MASTER OF SCIENCE

PLANT BREEDING

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO. MARCH 1996

M.C. Fernando Borrego Escalante -Advisor-

Key words: prickly pear cactus, *Opuntia spp*, physiological traits,
efficiency, productivity, intensive production.

This study had the following objectives: (a) to determine physiological traits of efficiency and productivity, under half-forced poliethylen tunnels; (b) to find out the most adequate system of production based on fertilizar

levels, plant densities and genotypes; (c) to accomplish phenotypic correlations analysis among physiological traits in study: Dry Weight (DW), Crop Growth Ratio (CGR), Growth Crop Rate (GCR), Relative Growth Rate (RGR), Leaf Area Ratio (LAR) and Net Assimilation Rate (NAR); (d) by path coefficient analysis to determine the traits that contribute the most to photosynthetic efficiency (NAR) of the genotypes in study. The genetic materials for this study were: AN-V1, AN-V3, AN-V5 y AN-TV6 all under high and low organic fertilization (dry cow dung) with five plant densities (10, 20, 30, 40 and 50 plants/m²). The following data were recorded; bud production, bud dry weight and bud number and also the physiological traits, CGR, GCR, RGR, LAR and NAR.

Results showed differences in production, dry weight and numbers of bud, between plant densities and genotypes. The best plant density was 20 plants/m² being equal statistically to 10 and 30 plants/m². The best genotypes for the same variables were AN-TV6 and AN-V1, the last genotype was the best photosynthetically with 30 plantas/m² and AN-TV6 was equal statistically with 40 and 50 plants/m². The CGR and GCR highest were with high fertilization. AN-V3 and AN-V5 had GCR highest. Had the best LAR, AN-V3 and AN-V5 with 50 plantas/m². AN-V1 and AN-V3 with 40 plantas/m², high and low fertilization, respectly were the best in RGR. In general, DW, CGR, GCR, RGR and LAR were higly and positively correlated with NAR. These parameters explain the photosynthetic efficiency through NAR in the studied genotypes.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
INDICE DE CUADROS.....	xiii
INDICE DE FIGURAS.....	xvi
INTRODUCCION.....	1
REVISION DE LITERATURA.....	5
ZONAS ARIDAS Y SEMIARIDAS DE MÉXICO.....	5
CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE NOPAL.....	6
FERTILIZACION EN NOPAL.....	7
INFLUENCIA DE FACTORES FISIOLÓGICOS EN LA EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA.....	9
PARAMETROS FISIOTÉCNICOS.....	15
<i>Tasa de Asimilación Neta</i>	16
<i>Tasa de Crecimiento del Cultivo</i>	18
<i>Tasa Relativa de Crecimiento</i>	19
<i>Índice de Área Foliar</i>	20
ESTUDIOS DE DENSIDAD DE PLANTACION Y AMBIENTES SEMI-CONTROLADOS EN NOPAL.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	25

MATERIAL VEGETATIVO Y ORIGEN.....	26
DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO.....	28
<i>Selección del Material Madre.....</i>	<i>28</i>
<i>Preparación del Terreno.....</i>	<i>28</i>
<i>Fecha y Método de Plantación.....</i>	<i>29</i>
<i>Tamaño de la Parcela Experimental.....</i>	<i>30</i>
<i>Parcela Util.....</i>	<i>32</i>
<i>Prácticas Agronómicas.....</i>	<i>32</i>
TOMA DE DATOS.....	33
<i>Producción de brote (cosecha).....</i>	<i>33</i>
<i>Area Foliar.....</i>	<i>34</i>
ECUACIONES DE PREDICCIÓN.....	35
ANALISIS ORGANOLEPTICO.....	38
DISEÑO EXPERIMENTAL.....	39
ANALISIS ESTADISTICO.....	40
<i>Análisis de Varianza y Pruebas de Rango Múltiple.....</i>	<i>40</i>
<i>Análisis de Correlación Fenotípica.....</i>	<i>41</i>
<i>Análisis de Sendero.....</i>	<i>42</i>
<i>Modelo Estadístico.....</i>	<i>45</i>
RESULTADOS	47
PRODUCCION DE BROTES.....	47
PESO SECO.....	48
NUMERO DE BROTES.....	49
PARAMETROS FISIOTECNICOS.....	55
ANALISIS DE CORRELACION FENOTIPICA.....	79
<i>Genotipo AN-V1.....</i>	<i>79</i>
<i>Genotipo AN-V3.....</i>	<i>79</i>
<i>Genotipo AN-V5.....</i>	<i>80</i>
<i>Genotipo AN-TV6.....</i>	<i>81</i>

ANALISIS DE COEFICIENTES DE SENDERO.....	82
<i>Genotipo AN-V1</i>	82
<i>Genotipo AN- V3</i>	83
<i>Genotipo AN-V5</i>	85
<i>Genotipo AN-TV6</i>	86
ANALISIS ORGANOLEPTICO.....	88
DISCUSION.....	90
PRODUCCION DE BROTE, PESO SECO DE BROTE Y NUMERO DE BROTOS.....	90
PARAMETROS FISIOTECNICOS.....	93
<i>Tasa de Asimilacion Neta</i>	93
<i>Indice de Crecimiento del Cultivo</i>	94
<i>Tasa de Crecimiento del Cultivo</i>	95
<i>Tasa Relativa de Crecimiento</i>	96
<i>Indice de Area Foliar</i>	97
ANALISIS DE SENDEROS.....	99
<i>Peso Seco</i>	101
<i>Indice de Crecimiento del Cultivo</i>	102
<i>Tasa de Crecimiento del Cultivo</i>	103
<i>Tasa Relativa de Crecimiento</i>	103
<i>Indice de Area Foliar</i>	104
CONCLUSIONES.....	105
RESUMEN.....	107
LITERATURA CITADA.....	109

INDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Página
3.1	BREVE DESCRIPCION DE LOS CUATRO GENOTIPOS UTILIZADOS EN LA PRESENTE INVESTIGACION.....26
3.2	FORMULAS Y UNIDADES RESPECTIVAS DE LOS PARAMETROS FISIOTECNICOS INCLUIDOS EN LA PRESENTE INVESTIGACION.....34
3.3	COEFICIENTES DE CORRELACION Y DETERMINACION PARA LAS VARIABLES DE PESO SECO Y AREA FOLIAR DE LOS GENOTIPOS EN ESTUDIO.....37
3.4	ECUACIONES DE PREDICCION PROPUESTAS PARA CADA GENOTIPO, CONSIDERANDO LA RELACION LINEAL ENTRE AREA FOLIR Y PESO SECO.....38
4.1	ANALISIS DE VARIANZA (CUADRADOS MEDIOS) PARA PRODUCCION DE BROTES, PESO SECO DE BROTES Y NUMERO DE BROTES.....50
4.2	PRUEBA DE RANGO MULTIPLE (DUNCAN 0.05) PARA PRODUCCION DE BROTES, PESO SECO DE BROTES Y NUMERO DE BROTES CONSIDERANDO EL FACTOR DENSIDADES DE PLANTACION.....51
4.3	PRUEBA DE RANGO MULTIPLE (DUNCAN 0.05) PARA PRODUCCION DE BROTES, PESO SECO DE BROTES Y NUMERO DE BROTES, CONSIDERANDO EL FACTOR GENOTIPOS.....51
4.4	ANALISIS DE VARIANZA (CUADRADOS MEDIOS) PARA LOS PARAMETROS FISIOTECNICOS, TAN, ICC, TCC, TRC, E IAF.....56
4.5	PRUEBA DE RANGO MULTIPLE (DUNCAN 0.05) PARA TAN E IAF, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD57

4.6	PRUEBA DE RANGO MULTIPLE (DUNCAN 0.05) PARA ICC Y TCC, CONSIDERANDO LOS NIVELES DEL FACTOR FERTILIZACIONES.....	62
4.7	PRUEBA DE RANGO MULTIPLE (DUNCAN 0.05) PARA TCC E IAF CONSIDERANDO EL FACTOR GENOTIPOS.....	66
4.8	PRUEBA DE RANGO MULTIPLE (DUNCAN 0.05) PARA TRC, CONSIDERANDO LA INTERACCION DE LOS FACTORES GENOTIPO DENSIDAD FERTILIZACION.....	67
4.9	PRUEBA DE RANGO MULTIPLE (DUNCAN 0.05) PARA IAF, CONSIDERANDO EL FACTOR DENSIDADES.....	72
4.10	MATRIZ DE CORRELACIONES FENOTIPICAS PARA PS Y PARAMETROS FISIOTECNICOS (ICC, TCC, TRC E IAF) CON LA TAN, CONSIDERANDO LOS VALORES DEL GENOTIPO AN-V1.....	79
4.11	MATRIZ DE CORRELACIONES FENOTIPICAS PARA PS Y PARAMETROS FISIOTECNICOS (ICC, TCC, TRC E IAF) CON LA TAN, CONSIDERANDO LOS VALORES DEL GENOTIPO AN-V3.....	80
4.12	MATRIZ DE CORRELACIONES FENOTIPICAS PARA PS Y PARAMETROS FISIOTECNICOS (ICC, TCC, TRC E IAF) CON LA TAN, CONSIDERANDO LOS VALORES DEL GENOTIPO AN-V5.....	81
4.13	MATRIZ DE CORRELACIONES FENOTIPICAS PARA PS Y PARAMETROS FISIOTECNICOS (ICC, TCC, TRC E IAF) CON LA TAN, CONSIDERANDO LOS VALORES DEL GENOTIPO AN-TV6.....	82
4.14	COEFICIENTES DE SENDERO DE LOS EFECTOS DIRECTOS E INDIRECTOS PARA LAS VARIABLES PS, ICC, TCC, TRC E IAF CON LA TAN, CONSIDERANDO LOS VALORES DEL GENOTIPO AN-V1.....	83
4.15	COEFICIENTES DE SENDERO DE LOS EFECTOS DIRECTOS E INDIRECTOS PARA LAS VARIABLES PS, ICC, TCC, TRC E IAF CON LA TAN, CONSIDERANDO LOS VALORES DEL GENOTIPO AN-V3.....	85
4.16	COEFICIENTES DE SENDERO DE LOS EFECTOS DIRECTOS E INDIRECTOS PARA LAS VARIABLES PS, ICC, TCC, TRC E IAF CON LA TAN, CONSIDERANDO LOS VALORES DEL GENOTIPO AN-V5.....	86

4.17	COEFICIENTES DE SENDERO DE LOS EFECTOS DIRECTOS E INDIRECTOS PARA LAS VARIABLES PS, ICC, TCC, TRC E IAF CON LA TAN, CONSIDERANDO LOS VALORES DEL GENOTIPO AN-TV1.....	88
4.18	ANALISIS ORGANOLEPTICO DE DOS GENOTIPOS DE NOPAL (AN-V1 Y AN- TV6) PROMEDIO DE 60 DEGUSTACIONES, CONSIDERANDO APARIENCIA DE LA PENCA Y DIFERENTES PLATILLOS.....	89
4.19	PROMEDIOS DE PH POR GENOTIPO, CONSIDERANDO LOS FACTORES FERTILIZACIONES, DENSIDADES Y REPETICIONES.....	89

INDICE DE FIGURAS

Figura No.	Página
3.1	DISTRIBUCION DE TRATAMIENTOS Y REPETICIONES EN CAMPO.....31
4.1	PRODUCCION DE BROTES CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD-FERTILIZACION.....52
4.2	PESO SECO DE BROTES CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD-FERTILIZACION.....53
4.3	NUMERO DE BROTES CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD-FERTILIZACION.....54
4.4	TASA DE ASIMILACION NETA PARA AN-V1, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD.....58
4.5	TASA DE ASIMILACION NETA PARA AN-V3, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD.....59
4.6	TASA DE ASIMILACION NETA PARA AN-V5, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD.....60
4.7	TASA DE ASIMILACION NETA PARA AN-TV6, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD.....61
4.8	INDICE DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO CONSIDERANDO LOS NIVELES DE FERTILIZACIONES.....63
4.9	TASA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO CONSIDERANDO LOS GENOTIPOS EN ESTUDIO.....64
4.10	TASA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO, CONSIDERANDO LOS NIVELES DE FERTILIZACION.....65

4.11	TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO PARA AN-V1, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD-FERTILIZACION.....	68
4.12	TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO PARA AN-V3, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD-FERTILIZACION.....	69
4.13	TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO PARA AN-V5, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD-FERTILIZACION.....	70
4.14	TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO PARA AN-TV6, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD-FERTILIZACION.....	71
4.15	INDICE DE AREA FOLIAR, CONSIDERANDO LAS DENSIDADES EN ESTUDIO.....	73
4.16	INDICE DE AREA FOLIAR, CONSIDERANDO LOS GENOTIPOS EN ESTUDIO.....	74
4.17	INDICE DE AREA FOLIAR PARA AN-V1, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD.....	75
4.18	INDICE DE AREA FOLIAR PARA AN-V3, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD.....	76
4.19	INDICE DE AREA FOLIAR PARA AN-V5, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD.....	77
4.20	INDICE DE AREA FOLIAR PARA AN-TV6, CONSIDERANDO LA INTERACCION GENOTIPO-DENSIDAD.....	78

INTRODUCCION

Las zonas áridas y semiáridas de México, debido a las condiciones climáticas adversas, permiten pocos cultivos susceptibles de explotación y sus rendimientos son tan pobres que producen bajos ingresos para los agricultores, lo que hace poco atractiva ésta actividad.

En estas regiones, existen especies de plantas desérticas y semidesérticas que revelan en su morfología y fisiología algunas características reales y potenciales que les permiten adaptarse al medio ecológico (suelo, agua y clima), además de su sistema de explotación fácil y rentable. Una de estas plantas es el nopal, (*Opuntia spp*) el cual representa una alternativa de mucha importancia para los habitantes de dichas zonas, por su susceptibilidad de explotarse, ya que debido a la falta de fuentes de trabajo, se ven obligados a emigrar en busca de mejores oportunidades hacia las áreas urbanas; esta constante emigración origina un serio problema para las grandes ciudades, donde forman grandes cinturones de miseria.

En la actualidad, el nopal se considera como un recurso natural de alto

valor económico, debido principalmente a su uso en la alimentación humana y animal, así como por su potencial industrial. El aprovechamiento más común del nopal es la obtención de fruta fresca (tuna), brotes tiernos (nopalitos) y forraje.

El hombre depende de las plantas para alimento, vestido, albergue, mantenimiento del ambiente y belleza natural; pero las plantas y la flora también necesitan del hombre, porque las actividades humanas usualmente alteran el medio, a menudo en forma destructiva. Las acciones destructivas incluyen la explotación o cosecha total de los recursos renovables o la eliminación de gran parte o toda la flora por modificación destructiva del ambiente. Algunos sistemas de las civilizaciones de más alto desarrollo conducen a ataques constructivos sobre el ambiente, tal es el caso de la agricultura, la modificación de la fisiografía para adecuarla al crecimiento de plantas y la modificación de las plantas por diversos medios, estableciendo una interacción entre las plantas y el hombre en la que los principios fisiológicos representan una parte importante y esta interacción se lleva a cabo cuando alcanza la humanidad en su desarrollo histórico el nivel de agricultura, que incluye la domesticación de plantas, selección de características para rendimiento, fortalecimiento, métodos de cosecha y sobre todo técnicas para la práctica y mejoramiento de las mismas que deben basarse en un profundo conocimiento de la física del ambiente y de la fisiología de aquellos, misma, que en general, no es tomada en cuenta, a pesar de saber que el conocimiento moderno de los mecanismos fisiológicos del crecimiento y metabolismo puede

utilizarse ahora en investigación para incrementar la calidad y cantidad de los cultivos y para mejorar la sobrevivencia o ampliar el rango adaptativo de plantas deseables.

Considerando la importancia del nopal en las regiones áridas y semiáridas, la problemática existente y que el uso de parámetros fisiotécnicos puede conducir a encontrar genotipos con alta eficiencia fotosintética, se plantea la realización del presente trabajo, con los siguientes:

Objetivos

- ◆ Determinar parámetros fisiotécnicos de eficiencia y productividad, bajo condiciones de semi-forzado en túneles de polietileno.

- ◆ Encontrar el sistema de producción más adecuado considerando los factores: fertilizaciones, densidades y genotipos en condiciones de semi-forzado en túneles de polietileno.

REVISION DE LITERATURA

Zonas áridas y semiáridas de México

Beltrán (1964) menciona que las tierras áridas y semiáridas de México, constituyen para el país un problema de gran magnitud, ya que ocupan más de la mitad del territorio nacional, precisamente en aquellas zonas donde es mayor la concentración demográfica.

Borrego (1986) cita que las zonas áridas y semiáridas de México, ocupan más del 60 por ciento del área total del país; esto es, aproximadamente 1,450,000 km². Debido a la precipitación pobre y errática, así como las heladas tempranas y tardías, los cultivos de temporal no son redituables, provocando en mucha medida la emigración hacia los centros urbanos, así como una sobreexplotación de los escasos recursos naturales susceptibles de explotación económica. Entre éstos, se cuenta con la candelilla, la lechuguilla, la palma china, el guayule, sotol, maguey y nopal.

Cienfuegos (1986) señala que México cuenta con 196.7 millones de

hectáreas de las cuales 36.9 millones (18.76 por ciento), se clasifican como aptas para el cultivo, sin embargo, de éstas solo producen 19.74 millones de hectáreas (53.5 por ciento) y el resto, 17.16 millones (46.5 por ciento), se consideran como "tierras ociosas". De la superficie total con que cuenta el país, 159.8 millones de hectáreas (81.24 por ciento) se citan como "no aptas para el cultivo". De acuerdo con lo anterior, no se aprovecha el 50 por ciento de las tierras aptas para la producción, entre las causas se mencionan las siguientes: problemas originados por los tipos de tenencia de la tierra y descapitalización de los campesinos; desorganización agraria y especialmente la escasez del recurso agua.

Características Principales de Nopal

Borrego (1986) señala que el nopal pertenece a la familia de las cactáceas, las cuales son originarias del Continente Americano y se distribuyen desde Canadá hasta Argentina. El nopal pertenece al género *Opuntia*, subgénero *Platyopuntia*, se caracteriza por tener cladodios planos e incluye un gran número de especies. Es una planta xerófita, adaptada a las condiciones de aridez, poseyendo características especiales para captar al máximo las pocas lluvias que caen y además, evitar su pérdida; posee un sistema radical con raíces secundarias muy superficiales que se extienden ampliamente en el terreno; cladodios gruesos y suculentos; estomas hundidos y cubiertas cerosas para disminuir la transpiración. Por lo general se adapta a diferentes tipos de suelos, prefiriendo

aqueños con un pH alcalino y desarrollando mejor en regiones con temperaturas que oscilan entre 18° y 26° C; no obstante, se puede encontrar creciendo en lugares con temperaturas inferiores o superiores a las mencionadas; en cuanto a la altitud, puede crecer desde 2 hasta 2675 msnm, sin embargo, la ideal fluctúa entre 800 y 2500 msnm.

Fertilización en Nopal

Rzedowski (1981) señala que el género *Opuntia* tiende a formar asociaciones con *Acacia* y principalmente con el género *Prosopis*; sería muy importante realizar un estudio de esta tendencia, ya que *Prosopis* y *Acacia* son leguminosas que pueden fijar biológicamente el nitrógeno, y el nopal responde muy bien a aplicaciones de estiércol y fertilizaciones nitrogenadas.

García y Grajeda (1991) mencionan que el nopal es una planta que responde muy bien a la aplicación de fertilizantes o abonos; aconsejando aplicar de 50 a 100 ton de estiércol de cabra, de vaca o de caballo por hectárea, mezclándolo muy bien con los 25 cm superiores del suelo.

López y Cruz (1988) con el objeto de estudiar el efecto de la fertilización química y orgánica en nopal tunero (*Opuntia amyclaea* T.) aplicaron dosis de Nitrógeno (N), 50, 100, 150 kg/ha; Fósforo (P) 40, 80, 120 kg/ha; Potasio (K),

30, 60 kg/ha y tres dosis de estiércol de bovinos, ovinos y gallinaza, solos y combinados con los elementos antes citados. Encontraron que la fertilización tuvo efecto principalmente en la producción de brotes vegetativos y florales, rebrotación de yemas florales después de los daños por bajas temperaturas, así como en la emisión de brotes vegetativos y florales en tallos mayores de un año de edad. Mediante la respuesta del nopal tunero a la fertilización y la relación con los sitios de fructificación de las plantas estudiadas dio bases firmes para indicar como manejar la poda de fructificación en esta especie.

Méndez y Martínez (1988) estudiando en una plantación comercial que contenía tres formas de nopal (Cuerona, Cristalina y Amarilla); estudiaron cuatro niveles de nitrógeno (N) 0, 40, 100 y 150 kg/ha; fósforo (P) 0, 40, 80 y 120 kg/ha y estiércol vacuno (0, 5 10 y 15 ton/ha). Aplicándose el nitrógeno en dos épocas (mayo y julio). El rendimiento medio, obtenido por la forma cristalina (1082 g) superó estadísticamente al obtenido por las formas Cuerona (882 g) y Amarilla (762 g). El mejor tratamiento de fertilización química y orgánica fue el 100-80-10 de N, P y estiércol, respectivamente, con un rendimiento medio de 1104 g , que fue superior estadísticamente al de la parcela testigo (493 g). Se encontró una correlación positiva de las aplicaciones de N y P con el rendimiento, con valores de $r > 0.90$. El número de brotes, se correlacionó negativamente con área foliar y peso de los mismos.

Nerd *et al.*, (1991) determinaron que la fertilización y los períodos cortos de sequía tienen una gran influencia en la productividad en *Opuntia ficus-indica*. La fertilización incrementa la producción de brotes florales tanto para las cosechas de invierno como para las de verano, mientras que las plantas sometidas a períodos de sequía sufren una alta mortalidad de brotes florales.

Influencia de Factores Fisiológicos en la Eficiencia y Productividad de Nopal

Nobel y Hartsock (1986) en base a condición de agua, temperatura del aire y radiación fotosintéticamente activa, midieron la captación neta de CO₂ en *Agave deserti*, *Ferocactus acanthodes* y *Opuntia ficus-indica*, y construyeron un Índice Ambiental de Productividad indicando la influencia de estos factores sobre dicha captación.

Nobel (1988) menciona que las plantas como el *Agave deserti* y el nopal *Opuntia ficus-indica* tienen una productividad anual más alta que el promedio de los ecosistemas desérticos (0.71 y 1.37 kg/m²/año de materia seca, respectivamente); cuando el agua no es una limitante, los valores promedios de productividad son más altos que los de muchos cultivos agrícolas en explotación. Encontró que a nivel laboratorio la captación neta de CO₂ de ambas especies, depende de las condiciones de suelo, agua, temperatura y de la radiación fotosintéticamente activa. Se le asignó un índice a cada uno de las variables antes

mencionadas, denominándole Índice Ambiental de Productividad. Determinó que el Índice Ambiental de Productividad para las especies en estudio fue de 0.21 para *Agave deserti* en condiciones naturales y 0.20 para *Opuntia ficus-indica* bajo riego.

Nobel (1991) pronosticó la productividad de *Opuntia ficus-indica*, basado en los índices de agua, temperatura del aire y la densidad de radiación fotosintéticamente activa. Determinó estos índices en 87 regiones de Estados Unidos de Norteamérica y en 148 regiones alrededor del mundo, apoyándose en datos de varias estaciones climatológicas. Determinó 37 sitios en Estados Unidos de Norteamérica y 110 alrededor del mundo como apropiados para cultivar nopal, debido a que presentan siempre temperaturas por arriba de los 10° C. Encontró 20 sitios para Estados Unidos y 12 alrededor del mundo donde la productividad es por lo menos de 15 ton de materia seca por hectárea por año, (perteneciendo estos sitios a aquellos determinados como apropiados para cultivar nopal), esta alta productividad se debió a la alta concentración de CO₂ atmosférico, por lo que fue satisfactoria la captación neta del mismo.

Nobel y García (1991) señalan que el *Opuntia ficus-indica* puede tener una productividad anual mayor que la de muchos cultivos, dicha productividad, está influenciada por el índice de agua, temperatura y la radiación fotosintéticamente activa y se puede predecir, en base a estas variables

ambientales, asociadas con las concentraciones elevadas de CO_2 . La ganancia de peso seco de *Opuntia ficus-indica* bajo condiciones controladas (650 microlitros de CO_2), fue de 23 por ciento mayor en 650 que en 350 microlitros de CO_2 . Indican que bajo condiciones controladas el Índice Ambiental de Productividad es cercano a 0.10, mientras que en las regiones desérticas, el índice de agua disminuye la productividad; en las regiones frías, las temperaturas hacen que disminuya el índice de productividad y en el noreste y noroeste el índice de radiación fotosintéticamente activa hace que disminuya el Índice Ambiental de Productividad. El Índice Ambiental de Productividad pronosticado en este trabajo para *Opuntia ficus-indica* fue de 12.8 Mg/ha/año bajo condiciones ambientales no controladas y 16.5 Mg/ha/año bajo condiciones controladas con 650 microlitros de CO_2 .

García y Nobel (1986) desarrollaron un modelo para simular la captación de luz por cada cladodio usando diferentes densidades de plantación. Se usaron diferentes estructuras de la planta y orientación de los cladodios. Encontraron que las productividades mayores de 40 por ciento pueden ser obtenidas mediante el incremento de índices altos de tallos por área superiores a 4.0 para plantas que tienen cinco cladodios; para productividades mas altas, se aumentan las densidades, pero los incrementos no son significativos. Ocurrió una alta productividad para los cladodios orientados hacia el este-oeste en densidades de plantación bajas. De cualquier manera, las altas densidades de plantación,

dirección de los surcos y orientación individual de cladodios tuvieron un efecto significativo en la productividad, pero las plantas con cladodios orientados nortesur tendieron a tener una productividad más alta.

García y Nobel (1990) realizaron predicciones de productividad en *Opuntia ficus-indica* para 253 regiones del mundo. Los índices de temperatura, agua y el índice de radiación fotosintéticamente activa, tienen un valor máximo de unidad cuando ese factor ambiental no está limitado por la captación neta de CO₂ para *Opuntia ficus-indica* por períodos de 24 hr, estos factores se multiplican y nos dan un Índice Ambiental de Productividad, el cual indica cómo los tres factores ambientales limitan la captación neta de CO₂ y por lo tanto la productividad.

Acevedo *et al.*, (1983) estudiando respuestas fisiológicas del metabolismo de las plantas crasas como el *Opuntia ficus-indica*, encontraron que cladodios jóvenes y brotes florales presentan apertura de estomas en el día, mientras que cladodios maduros y frutos presentan apertura de estomas por la noche (característica de las plantas CAM); además un déficit de agua, suprime la apertura de estomas por la noche en cladodios maduros. La tasa de asimilación neta, la cual fue positiva a través del año, promedió 3.4 gr/m²/día para plantas de uno y dos años de edad. Las plantas con cinco años tuvieron 7.2 m² de cladodios

por superficie de área y una productividad anual en peso seco de 13 megagramos (toneladas métricas) por hectárea por año.

Becerra *et al.*, (1976) mencionan que el nopal realiza la fotosíntesis en las partes verdes del tallo (cladodios), debido a la forma de éstos, la captación de luz depende en gran parte de su orientación. Estudiaron la orientación de los cladodios para ver la relación de ésta con la eficiencia fotosintética y el efecto sobre la producción y calidad de frutos, producción de materia seca, enraizamiento de cladodios y temperatura interna de los mismos; concluyeron que la orientación norte-sur de los cladodios (con sus caras hacia el este-oeste), es más eficiente en la captación de luz, producen mayor número de frutos y con mayor contenido de sólidos solubles, mayor producción de materia seca y emiten mayor número de raíces.

Bravo (1978) señala que en el nopal la fotosíntesis se efectúa de manera principal en el tallo (cladodio), ya que las hojas cuando son muy pequeñas se desprenden del cladodio; estos órganos además de servir para el transporte de savia ascendente y descendente realizan la fotosíntesis a través del parénquima clorofiliano situado abajo de la epidermis y tejido suberoso. La estructura de este parénquima es análogo al parénquima en empalizada de las hojas, y está constituido de varias capas de células prismáticas de gran tamaño y paredes delgadas con numerosos cloroplastos; este parénquima se comunica al exterior

por los estomas, gradualmente se convierte en acuífero constituyendo la zona central y esponjosa del cladodio por donde circula la savia ascendente, este tejido esponjoso almacena grandes cantidades de agua lo cual en parte permite mantener a la planta por grandes períodos de sequía.

Grajeda (1978) menciona que el nopal se ubica en el grupo de las plantas xerófitas con resistencia a la sequía, pues presenta características morfológicas que le permiten la economía del agua. Algunas de ellas son:

- ◆ Desaparición de las hojas, cayendo las pequeñas, ubicadas en las areolas, y con ello reduciendo la superficie de transpiración romper corrientes de aire y la presencia de espinas en algunas especies que sirven para condensar el agua, proporcionar sombra al cladodio y dar protección física.
- ◆ Los estomas están hundidos, manteniendo una especie de microclima húmedo en la cámara estomática.
- ◆ La cutícula es muy gruesa, reduciendo la transpiración cuticular, el aumento de temperatura interna y el mantenimiento de la actividad metabólica.

- ◆ El sistema de raíces es extenso y llega a medir hasta 8 m de longitud, distribuido principalmente en los 40 cm superiores del suelo, sujetando las raíces al suelo por su distribución y horizontal.

Parámetros Fisiotécnicos

Brinkham y Frey (1977) mencionan que los parámetros que constituyen un análisis de crecimiento son, la Tasa de Asimilación Neta (TAN), Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC). Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), Índice de Area Foliar (IAF), Relación de Area Foliar (RAF) y Duración del Area Foliar (DAF).

Fakorede y Mock (1980) además de los anteriores parámetros, estiman Peso Específico Foliar (PEF), Tasa Relativa de Crecimiento Foliar (TRCF), Duración del Peso Foliar (DPF), Relación de Peso Foliar (RPF), Area Foliar Específica (AFE) y Duración del Peso de Tallo (DPT).

Tasa de Asimilación Neta (TAN)

Watson (1952) señala que la TAN es un incremento en peso seco por unidad de área foliar por unidad de tiempo, la cual es una medida indirecta de la fotosíntesis.

Watson (1956) indica que la mayor influencia sobre la tasa de asimilación neta de materia orgánica es ejercida por la luz y la temperatura. Sin embargo, se ha observado que los valores de la tasa de asimilación neta son afectados por otros factores, tales como fertilización, condición de agua en la planta, genotipo, etc.

Según Verhagen *et al.*, (1963) la eficiencia fotosintética de las plantas se expresa en términos de la tasa de asimilación neta, que es la cantidad de materia seca producida por unidad de hoja por unidad de tiempo.

Radford (1967) define la TAN de una planta en un instante de tiempo (t) como el incremento de materia de una planta por unidad de material asimilado por unidad de tiempo.

Beadle (1988) menciona que el término de tasa de asimilación neta con frecuencia se usa de manera intercambiable con la tasa foliar unitaria pero se

prefiere ésta última. Estas miden el aumento neto en el peso seco de la planta por área foliar unitaria (kg/m^2) y diferente de la tasa fotosintética que mide la ganancia neta de carbono solo durante el período de luz.

Becerra *et al.*, (1976) determinaron la tasa de asimilación neta en nopal para estudiar la eficiencia fotosintética de esta planta en relación con la orientación de sus cladodios; para tal propósito se obtuvieron muestras de cladodios mediante un sacabocados de un diámetro constante, la primera de ellas por la mañana y por la tarde del mismo día se obtuvo la segunda muestra del mismo cladodio. Se determinó la producción de materia seca y con ella la TAN, encontrándose que la orientación norte-sur de cladodios es más eficiente fotosintéticamente, ya que la materia seca en la orientación norte-sur incrementó un promedio de $0.270 \text{ mg/cm}^2/\text{hora}$; mientras que en los cladodios este-oeste se obtuvo un incremento de $0.124 \text{ mg/cm}^2/\text{hora}$. El análisis de varianza mostró que estas diferencias en el incremento de materia seca, son altamente significativas.

Grajeda (1978) en su estudio con nopal (*Opuntia ficus-indica* cv. tlaconopal) al incluir densidades de plantación, edades de cladodio, fechas de corte, tamaño de la primera emisión de brotes, intensidades de poda, dinámica de producción y producción de materia verde y seca, encontró que los resultados obtenidos en la tasa de asimilación neta determinada en el cladodio madre y en los brotes de la primera emisión fueron similares al comportamiento obtenido en

la producción por efecto de los mismos factores estudiados, por lo que plantea que existe una relación de causa efecto entre esas variables estudiadas. Además menciona que existe una relación estrecha en el índice de área foliar y la TAN. En general, se ha visto que la tasa de crecimiento del cultivo por unidad de área del suelo se incrementa a medida que el IAF aumenta hasta que la mayoría de la luz incidente es interceptada.

Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC)

Watson (1958) introdujo el concepto de tasa de crecimiento del cultivo, aclarando que ésta estima la producción de materia seca por unidad de terreno (s); además menciona que también es conocido como Índice de Crecimiento del Cultivo (ICC).

Radford (1967) define la tasa de crecimiento del cultivo o de una planta en un determinado instante de tiempo (t) como el incremento de material de la planta por unidad de tiempo. Esta tasa es la que indica la velocidad de crecimiento del cultivo y se utiliza principalmente para estudiar comunidades de plantas, ya que los pesos secos que se emplean se expresan en función de la superficie de terreno que las plantas ocupan.

Según Beadle (1988) el índice de área foliar se puede usar para calcular la tasa instantánea de crecimiento del cultivo (en cualquier tiempo t), que sirve como un índice simple de la productividad agrícola, se expresa en términos de peso por unidad de superficie y tiempo ($\text{kg/m}^2/\text{s}^{-1}$), por lo tanto TCC es conceptualmente similar a Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), pero no unitariamente, pues TRC se mide en $\text{g/g}^{-1}/\text{día}^{-1}$.

Tasa Relativa de Crecimiento (TRC)

Blackman (1919) definió la producción en término de una ley de interés compuesto (“si la tasa de asimilación por área foliar unitaria y la tasa de respiración permanecen constantes, y el tamaño del sistema foliar tiene una relación con el peso seco de la planta entera, la tasa de producción de material nuevo medido en peso seco, seguirá la ley de interés compuesto”) además, propuso el concepto de tasa relativa de crecimiento.

Beadle (1988) define la Tasa Relativa de Crecimiento del Cultivo en cualquier instante de tiempo (t) como el incremento del material presente y es el único componente del análisis de crecimiento que no requiere el conocimiento del tamaño del sistema asimilatorio.

Hunt (1981) menciona que la Tasa Relativa de Crecimiento proporciona una integración conveniente del desarrollo combinado de varias partes de la planta. Este es útil especialmente cuando las necesidades se incrementan para comparar especies y diferentes tratamientos sobre bases uniformes. Pero cuando es calculada en el nivel de la planta completa no nos dice nada de las causas de los procesos que contribuyen hacia el desarrollo grueso de la planta.

Indice de Area Foliar (IAF)

Watson (1947) tomó como medida relevante desde el punto de vista de la producción agrícola, al área foliar (AF) por unidad de área de terreno (s) y la determina como índice de área foliar.

Beadle (1988) al considerar la productividad de cultivos o de ecosistemas naturales, menciona que es conveniente expresar su comportamiento por unidad de área de terreno, por lo tanto, la razón de área foliar es inapropiada y se usa por segundo término, el cual es el área foliar por área unitaria de terreno o índice de área foliar (IAF).

Hunt (1981) menciona que la tasa unitaria de área foliar es un estimador adecuado de la eficiencia de cantidades unitarias de hojas de los cultivos como productores de materia seca, por lo tanto es necesario un conocimiento también

del área foliar total de un cultivo antes del desarrollo completo que puede ser medido. El área foliar por planta es una medida inapropiada del área foliar total de un cultivo completo, al no tomar en cuenta el espacio de las plantas, un factor que puede ser claramente involucrado en cualquier estimación de área foliar total de un cultivo. Para vencer esta dificultad, se introdujo el concepto de área foliar total en relación al área de terreno. Este es llamado el índice de área foliar y se define como el área foliar de la planta por unidad de área de terreno.

Verhagen *et al.*, (1963) mencionan que el Índice de Área Foliar óptimo ocurre cuando casi toda la luz disponible ha sido interceptada y la relación es máxima. Un aumento del IAF más allá del “óptimo” sombrea las hojas inferiores y otras partes de la planta tan fuertemente que para otras funciones la respiración excede a la fotosíntesis, con la consecuente caída de la TAN.

Estudios de densidad de plantación y ambientes Semi-controlados en Nopal

Bucio (1963) en un trabajo preliminar en la especie *Opuntia ficus-indica* cv “copo de nieve” encontró que en poblaciones de 866 plantas/ha hasta 1700 plantas/ha conforme se incrementa la densidad se aumenta el número de brotes por hectárea. En este trabajo debido al distanciamiento entre plantas no había competencia entre las mismas.

Barrientos y Flores (1969) probando densidades de 5,800 a 8,000 plantas/ha, encontraron que a medida que aumenta la población, se incrementa la producción, los incrementos de producción a niveles de población altos son menores que a niveles bajos, al aumentarse la población en general aumenta el número de pencas; con un incremento en las densidades, disminuye el peso de la penca, y en general la disminución en el peso de los cladodios es mayor a niveles de población altos. Dadas estas evidencias, en las cuales a esos niveles aún no se observa una disminución en la producción en la densidad mas alta, es posible tener explotaciones con densidades más altas, desarrollando prácticas de manejo por medio de las cuales se pueda aprovechar de una manera eficiente esas explotaciones, principalmente para la producción de brotes tiernos para el consumo humano y de forraje en setos.

Grajeda (1978) realizó tres experimentos en nopal (*Opuntia ficus indica*) cv. tlaconopal, caracterizada por su buena calidad de brote tierno; para estudiar los fenómenos y condiciones que permitieran derivar un método de producción intensiva de brotes tiernos y para que, en un momento dado, ésta se pueda controlar en forma eficiente, incluyó densidades de plantación, edades de cladodio, fechas de corte y otros factores descritos anteriormente, concluye que en la densidad de población estudiada más alta (55 plantas/m²), se obtuvieron las más elevadas producciones de brotes, siendo los cladodios de seis meses los más

productivos, lo cual evidencia que en ellos se presenta un equilibrio fisiológico de máxima eficiencia, saturándose en esa edad la respuesta de producción. Pero dado que solamente se incluyeron dos niveles del factor densidades no se pudo determinar la localización de ese punto en la curva teórica de producción.

Flores (1992) encuentra que a altas densidades hay mayor rendimiento en toneladas por hectárea, pero el tamaño y el peso del nopalito disminuye, por lo que será el propósito de la plantación (enlatado, comercializarlo en fresco o encapsulado) lo que determine la densidad adecuada. A mayores densidades, es posible obtener más altos rendimientos, aunque es necesario realizar un análisis económico final, pues es necesario suplementar mucho más abono orgánico, fertilizantes químicos y agua de riego.

Mejía (1988) indica que el sistema semi-forzado de cultivos bajo estructuras cubiertas con plástico, constituye una forma de producción intensiva, representando para el nopal ^{NOPAL} verdura grandes ventajas, ante el sistema a "cielo abierto", ya que la planta responde favorablemente a las condiciones generadas por la cubierta plástica, condición adecuada para obtener cosechas en épocas del año (invierno) en que la producción de "nopalito" disminuye y el precio aumenta. Se ha practicado este sistema plantando en el mes de septiembre, pencas de ocho meses a un año de edad, de 30 cm de largo por 20 cm de ancho como mínimo, bajo una densidad de población de 16 plantas/m² (25 cm entre hilera y 25 cm

entre planta y planta), en camas de dos metros de ancho, enterrando un tercio inferior (1/3) de la penca, con una capa de abono orgánico (estiércol semi-seco) de 10 cm de espesor y con riegos ligeros cada 20-30 días. Se ha utilizado como cubierta plástica, polietileno térmico calibre 600 de 40-50 m de largo por cuatro metros de ancho, varilla lisa de tres octavos (3/8) de pulgada en forma de arco, con una altura de 1.50 m e hilo de rafia para sujetar el film plástico y la estructura del túnel.

Tobar (1995) al estudiar la producción de verdura (rendimiento y calidad) de cuatro genotipos de nopal, considerando cinco densidades de plantación (10, 20, 30, 40 y 50 plantas/m²), dos fertilizaciones orgánicas y túneles de polietileno, encontró que la combinación que generó nopalitos con mejores características alimenticias fue la del genotipo AN-V3 con una densidad de 30 plantas/m², incorporando al suelo una capa de abono orgánico de 16 cm de espesor.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del Area de Estudio

Situada en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro" (UAAAN) en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Localizada entre los paralelos 25° 22' y 25° 21' de Latitud Norte y los meridianos 101° 03' de Longitud Oeste, y a una altitud de 1743 msnm. La temperatura media anual es de 19.8° C. Los meses más cálidos son junio, julio y agosto, con temperaturas que alcanzan hasta 39° C, mientras que en los meses de enero y diciembre se registran las temperaturas mas bajas, de hasta -13° C, presentándose heladas regulares en el período de noviembre a abril. La precipitación media anual es de 350 a 400 mm, siendo los meses más lluviosos julio, agosto y septiembre; en la época de invierno las lluvias que se presentan son moderadas. Tipo de clima BWhw (x')(e); clima muy seco, semicálido, con invierno fresco, extremoso, con lluvias de verano y precipitación invernal al 10 por ciento del total anual. Fotoperíodo medio anual es de 11.99 hr.

Fuente: Departamento de Agrometeorología, UAAAN 1996.

Material Vegetativo y Origen

Son materiales que provienen de colectas realizadas a partir de 1980. hechas en 78 sitios de la zona nopalera Potosino-Zacatecana, incluyendo también Hidalgo y el Estado de México. Las muestras fueron tomadas de poblaciones naturales, plantaciones particulares, huertos caseros y también a través de intercambio inter-institucional. En el Cuadro 3.1, se muestran los nombres de los genotipos, así como una breve descripción de los mismos.

Cuadro 3.1. Breve descripción de los cuatro genotipos utilizados en la presente investigación.

GENOTIPOS	DESCRIPCION
AN-V1	Usada para verdura, en estado adulto fructifica y produce tunas de color blanco, presenta características vegetativas entre <i>Opuntia robusta</i> y <i>Opuntia ficus-indica</i> .
AN-V3	Usada para verdura, en estado adulto fructifica y produce tunas de color blanco, presenta características vegetativas de <i>Opuntia crassa</i> .
AN-V5	Usada para verdura, en estado adulto fructifica y produce tunas de color amarillo, con características vegetativas de <i>Opuntia ficus-indica</i> .
AN-TV6	Usada con doble propósito, producción de verdura y tuna; la planta adulta produce fruto de color blanco, presenta características vegetativas de <i>Opuntia ficus-indica</i> .

AN-V = Selección Antonio Narro Verdura. AN-TV= Selección Antonio Narro Tuna-Verdura.

Un esquema de la obtención de las cuatro selecciones usadas en el experimento, se describe a continuación:

- * Colecta y selección de germoplasma.
 - * Cruzamiento de progenitores sobresalientes.
 - * Multiplicación y germinación en invernadero.
 - * Establecimiento a campo en densidades altas.
 - * Se toman 15 genotipos sobresalientes
 - * Se pasan a campo formando un lote de policruzas, para el estudio de factores genéticos fundamentales.
 - * Del lote de policruzas, se obtienen los genotipos ya mejorados.
- El lote de policruzas nos salva de caer en la reducción de la variabilidad.

Estos genotipos sobresalientes se encuentran establecidos en un lote de policruzas en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México y constituyen la base para el programa de mejoramiento genético a largo plazo, propagación a agricultores solicitantes y la base para estudios agronómicos futuros. Los genotipos AN-V5, AN-V3 y AN-TV6, provienen de variedades de alto potencial de exportación de fruto y que en las condiciones del norte de México esta capacidad no se ha manifestado, puesto que la diferenciación floral no se ha completado, dando gran

cantidad de brotes alargados y aplanados, de cutícula más o menos delgada, lo que los hace excelentes para verdura. El genotipo AN-V1, proviene de una selección contra frío, hecha en una plantación del poniente de Saltillo, Coahuila y que en 1984 sobrevivió a heladas severas de -14° y -12° C., presenta gran capacidad de brotación y recuperación pero es susceptible a la grana o cochinilla, del tipo silvestre (Flores, 1992).

Descripción del Experimento

Selección del Material Madre

El corte se inició el 30 de noviembre, utilizando para ello navajas de buen filo y realizando el corte justo en la unión de dos artículos. A menor herida, mayor eficiencia en la cicatrización y por lo tanto, menor incidencia de agentes patógenos. Se seleccionaron las pencas más grandes y sanas. Permanecieron 52 días en el deshidratado (bajo la sombra de algunos árboles). Se tuvo cuidado de realizar el volteo de pencas o cladodios cada dos semanas evitando con esto la encorvadura de la unidad de propagación.

Preparación del Terreno

Antes de la plantación, existía nopal ya establecido en el área,

primeramente se cortó y picó con machete para posteriormente incorporarse al suelo, seguido de varios pasos de rastra. Al final de este proceso, el suelo presentó apariencia lodosa, debido al alto contenido de humedad y savia del nopal. Al cabo de siete días, tiempo durante el cual se secó parcialmente el terreno, se pasó varias veces el arado (un poco más profundo), para terminar nuevamente con un paso de rastra. Después de 30 días, se emparejó el suelo con azadón y se extendió la capa de abono orgánico (excremento seco de bovino) sobre las tres camas, dejando una capa de ocho centímetros de espesor. Posteriormente se dio un último paso de rastra para lograr una parcial incorporación del abono al suelo. Se procedió a la delimitación de las parcelas que llevarían diferente nivel de estercolado, mediante el uso de estacas de madera y rafia. A las parcelas con nivel alto de fertilización orgánica, se les extendió una nueva capa de ocho centímetros de espesor, únicamente a estas parcelas, se les incorporó el abono con azadón y se niveló con rastrillo.

Fecha y Método de Plantación

La plantación se realizó el 21 de enero, abriendo un surco de 10 a 15 cm de profundidad y enterrando un tercio ($1/3$) de la parte inferior del cladodio con el corte hacia abajo, orientándolo de norte a sur (lados este-oeste), con el fin de proporcionarle más luz al cladodio. Después de plantar, se construyó el esqueleto de el microtúnel con varilla de tres octavos ($3/8$) cubierta de poliducto de plástico,

el cual cumple la función de evitar el roce directo de la varilla con el polietileno y así evitar la ruptura del mismo. Después de armada y reforzada la estructura, se cubrió con la película de polietileno transparente calibre 600 (150 M), ésto a los cinco días después de finalizada la plantación. Se llevó un control de ventilación mediante el destape de las camas o microtúneles. Conforme se presentaron condiciones calurosas del clima fue necesario destapar por completo el microtúnel.

Tamaño de la Parcela Experimental

El experimento consistió de tres camas de 28 m de largo por dos metros de ancho, donde cada cama es una repetición. Cada cama se dividió en dos partes iguales (14 x 2 m), una se destinó para las parcelas con alto nivel de fertilización (FA) y la otra para las parcelas con bajo nivel de fertilización (FB). En cada media cama, se establecieron cinco parcelas (2.8 x 2.0 m), representando cada una las cinco diferentes densidades (10, 20, 30, 40 y 50 plantas/m²). Después, cada parcela se dividió en cuatro parcelas pequeñas (0.7 x 2.0 m), donde se incluyeron cada uno de los cuatro genotipos en estudio (Figura 3.1).

Para una correcta distribución de las pencas en cada densidad, se construyeron cinco diferentes bastidores, utilizando como material tiras de

F E R T I L I Z A C I O N A L T A	AN-TV 6	30	C L A D O D I O S P O R M E T R O C U A D R A D O
	AN-V 5		
	AN-V 1		
	AN-V 3		
	AN-V 5	20	
	AN-V 1		
	AN-V 3		
	AN-TV 6	40	
	AN-V 1		
	AN-TV 6		
	AN-V 5		
	AN-V 3	50	
AN-V 5			
AN-TV 6			
AN-V 1	10		
AN-V 3			
AN-TV 6			
AN-V 5			
AN-V 1			
F E R T I L I Z A C I O N B A J A	AN-TV 6	40	M E T R O C U A D R A D O
	AN-V 1		
	AN-V 3		
	AN-V 5		
	AN-V 5	50	
	AN-V 1		
	AN-TV 6		
	AN-TV 6	10	
	AN-V 3		
	AN-TV 6		
	AN-V 1		
	AN-V 5	30	
AN-TV 6			
AN-V 3			
AN-V 1	20		
AN-V 3			
AN-V 5			
AN-TV 6			

REP I

F E R T I L I Z A C I O N B A J A	AN-V 5	10	C L A D O D I O S P O R M E T R O C U A D R A D O
	AN-TV 6		
	AN-V 1		
	AN-V 3		
	AN-V 5	30	
	AN-V 3		
	AN-TV 6		
	AN-TV 6	20	
	AN-V 1		
	AN-TV 6		
	AN-V 1		
	AN-V 1	50	
AN-TV 6			
AN-V 3			
AN-V 5	40		
AN-V 3			
AN-TV 6			
AN-V 1			
AN-V 1	20		
AN-TV 6			
AN-V 3			
AN-V 5			

REP II

F E R T I L I Z A C I O N B A J A	AN-V 3	40	C L A D O D I O S P O R M E T R O C U A D R A D O
	AN-V 1		
	AN-TV 6		
	AN-V 5		
	AN-V 3	10	
	AN-TV 6		
	AN-V 1		
	AN-V 5	30	
	AN-V 1		
	AN-TV 6		
	AN-V 3		
	AN-V 1	20	
AN-V 5			
AN-V 3			
AN-TV 6	50		
AN-V 1			
AN-TV 6			
AN-V 3			
AN-V 1	40		
AN-TV 6			
AN-V 1			
AN-V 5			
AN-V 3	10		
AN-TV 6			
AN-V 3			
AN-V 1	30		
AN-V 5			
AN-TV 6			
AN-V 1			

REP III

Figura 3.1. Distribución de tratamientos y repeticiones en campo.

madera, hilo de algodón y clavos. Con la madera se construyó un rectángulo de 0.7 por 2.0 m y se distribuyeron hilos guía, de acuerdo al número de plantas por densidad.

Parcela Util

La parcela útil consistió en marcar seis plantas (cladodios) ubicadas al centro, con competencia completa, dentro de cada una de las parcelas.

Prácticas Agronómicas

Se aplicó un riego de preplantación de 600 lt para cada túnel. Los riegos subsecuentes se fueron aplicando uno por semana, por un tiempo de 1 hr en cada microtúnel o repetición, principalmente cuando las condiciones climáticas fueron secas o desfavorables al cultivo, para dar un total de 14 riegos aplicados a lo largo del experimento. Para combatir malezas, se llevaron a cabo deshierbes manuales. También se realizó una reposición de plantas, ya que por daños de pudriciones, mecánicos y manuales, se perdieron varias plantas en las diferentes camas.

Toma de Datos

Producción de Brote (cosecha)

Los brotes tiernos o nopalitos, se cortaron cuando tenían una longitud aproximada de 10 a 15 cm sin descartar que estuvieran tiernos o de buen tamaño y presentación comercial, haciéndolo semanalmente considerando el comportamiento de cada uno de los genotipos en estudio. Las pencas consideradas como parcela útil, estaban identificadas mediante números (1, 3, 5 y 6). Una vez cortados los brotes tiernos se colocaban dentro de bolsas de papel con una identificación que contenía el número de repetición, el nivel de fertilización, la densidad y finalmente el genotipo. Una vez cosechados, se llevaban al laboratorio de fisiotecnia, donde se contabilizaba el número de brotes (nopalitos), el peso (Peso Fresco y Peso Seco) en una báscula electrónica semianalítica, posteriormente se picaban y se colocaban en charolas para llevarlos a estufa a 60°C por aproximadamente 48 hr para eliminar el agua contenida en los tejidos (Peso Seco de Brotes). Con estos datos, se calcularon los parámetros fisiotécnicos que se muestran en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Fórmulas y unidades respectivas de los parámetros fisiotécnicos incluidos en la presente investigación.

PARAMETRO	FORMULA	UNIDADES
Indice de Crecimiento del Cultivo	$\frac{(PS_2 - PS_1)}{A (t_2 - t_1)}$	$g/cm^{-2} / día^{-1}$
Indice de Area Foliar	$\frac{\text{Area Foliar planta}}{\text{Area terreno planta}}$	
Tasa de Crecimiento del Cultivo	$\frac{PS_2 - PS_1}{t_2 - t_1}$	$g/día^{-1}$
Tasa Relativa de Crecimiento	$\frac{(\log_e PS_2 - \log_e PS_1)}{t_2 - t_1}$	$g/g^{-1} / día^{-1}$
Tasa de Asimilación Neta (Asumiendo $PS=C+bA$)	$\frac{PS_2 - PS_1}{A_2 - A_1} \quad \frac{(\log_e A_2 - \log_e A_1)}{t_2 - t_1}$	$mg/cm^2 / día^{-1}$

Donde: PS= Peso Seco A= Area Foliar t= Tiempo
1= muestreo tiempo "t" 2= muestreo "t" + 10 días

Area Foliar

Con el objeto de determinar la ecuación de predicción para determinar área

foliar para cada uno de los tratamientos en todas las evaluaciones, considerando la relación lineal que existe entre área foliar y peso seco, se tomó área foliar de 20 brotes tiernos (nopalitos) de cada genotipo, a los cuales se les determinó área foliar con Integrador Electrónico de Área Foliar (LI-COR, LI-3100). posteriormente cada brote se metió a estufa por 48 horas a 60°C para determinar su peso seco.

Ecuaciones de Predicción

Para encontrar el grado de cambio en el peso seco del brote, definido como la variable dependiente (Y) por cada cambio unitario en el área foliar, definida como la variable independiente (X), se determinó la ecuación de predicción para cada uno de los genotipos, considerando la relación que existe entre área foliar y peso seco, la cual puede ser descrita por el modelo siguiente:

$$Y_i = \alpha + \beta (\chi_i) + E_i$$

donde:

Y_i = la estimación de la i-ésima observación de la variable dependiente.

χ_i = la i-ésima observación de la variable independiente.

α = intercepto (intersección de la línea de regresión con el eje Y).

β = Coeficiente de regresión (pendiente de la línea de regresión).

E_i = error aleatorio de la i-ésima observación.

Por lo tanto, el modelo quedó propuesto de la siguiente manera:

$$\text{PESO SECO} = \alpha + \beta (\text{AREA FOLIAR}) + E_i$$

Para comprobar la relación lineal entre peso seco y área foliar, primeramente se graficaron los datos de los 20 brotes con sus áreas y pesos respectivos en un plano de coordenadas, observando que la tendencia de respuesta entre las variables es aproximadamente lineal, así que se hizo inferencia, en primera instancia, que se trata de un caso particular de regresión lineal. Posteriormente, se definió si existe relación entre las variables involucradas por medio del coeficiente de correlación, estimado por mínimos cuadrados como "r", utilizando la fórmula siguiente:

$$r = \frac{\sum XY}{\sqrt{(\sum X^2)(\sum Y^2)}}$$

donde:

r= coeficiente de correlación.

$\sum XY$ = suma de productos X e Y.

$\sum X^2$ = varianza de la variable X.

$\sum Y^2$ = varianza de la variable Y.

Por otra parte, r^2 se define como el coeficiente de determinación, el cual, al expresar su valor numeral en porcentajes, nos da una idea del ajuste de la ecuación al modelo lineal en los datos observados; para obtenerlo, se elevó al cuadrado el coeficiente de correlación; en el Cuadro 3.3, se observan los coeficientes de correlación y determinación de cada uno de los genotipos.

Cuadro 3.3. Coeficientes de Correlación y Determinación para las variables de peso seco y área foliar de los genotipos en estudio.

GENOTIPOS	COEF. DE CORRELACION	COEF. DE DETERMINACION
AN-V1	0.7332 **	0.5376
AN-V3	0.6862 **	0.4708
AN-V5	0.7733 **	0.5979
AN-TV6	0.7309 **	0.5342

** Significativo al 0.01

Una vez que se determinó la ecuación para cada genotipo, se despejó la variable independiente (X) para considerarla como dependiente (Y), ya que mediante la ecuación de predicción, si tenemos valores de una de las variables dentro de los rangos comprendidos en la muestra, podemos estimar los valores de la variable no definida mediante el despeje de la misma. En el Cuadro 3.4, se muestran las ecuaciones propuestas para cada genotipo, así como el procedimiento de despeje.

Cuadro 3.4. Ecuaciones de predicción propuestas para cada genotipo, considerando la relación lineal entre área foliar y peso seco.

GENOTIPOS	ECUACIONES
AN-V1	$Y = 0.0528 + 0.0420 (X)$ $X = \frac{Y - 0.0528}{0.0420}$
AN-V3	$Y = 0.4736 + 0.0345 (X)$ $X = \frac{Y - 0.4736}{0.0345}$
AN-V5	$Y = - 0.6116 + 0.0404 (X)$ $X = \frac{0.6116 + Y}{0.0404}$
AN-TV6	$Y = - 1.4019 + 0.0549 (X)$ $X = \frac{1.4019 + Y}{0.0549}$

X= Area Foliar Y= Peso Seco

Análisis Organoléptico

Como complemento al trabajo y considerando que el gusto y la preferencia de alimento por la población es de vital importancia para cualquier producto de consumo humano, se realizó un análisis organoléptico, preparándose diferentes platillos a base de nopalitos, probándose solo dos genotipos (AN-V3 y AN-TV6), que de acuerdo con la experiencia con que se cuenta en la UAAAN, han sido los mejores tanto para rendimiento como para calidad proteica, alimenticia y de gusto por el consumidor. Para realizar este análisis se contó con un total de 60 personas mismas que se encargaron de llenar un cuestionario elaborado previamente para el

fin perseguido; las personas con las que se contó fueron maestros, laboratoristas y alumnos de diferentes maestrías de la UAAAN. La degustación incluyó calificaciones para la apariencia de la penca y para los diferentes platillos preparados de cada genotipo, cuya calificación tomó valores de 1 a 5 de la siguiente manera: 5 excelente; 4 muy buena; 3 buena; 2 regular y 1 mala. Para la penca se calificaron las características de color, tamaño, espinas, forma y firmeza, mientras que los platillos se calificaron de acuerdo con las características de apariencia, consistencia, sabor, acidez, viscosidad, color y olor de cada uno de ellos y para cada uno de los genotipos. Además, por ser un factor importante en el análisis organoléptico, se determinó el potencial de Hidrógeno (pH) de los cuatro genotipos, mediante técnica convencional en el laboratorio de fisiotecnia de la UAAAN.

Diseño Experimental

El diseño experimental utilizado fue un bloques completos al azar con tres factores en un arreglo de parcelas subdivididas con tres repeticiones.

Donde:

Factor A: fertilización orgánica, con dos niveles

F1= Abono orgánico, 8 cm de espesor

F2= Abono orgánico, 16 cm de espesor

Factor B: densidades de plantación, con cinco niveles

D1= 10 plantas/m²

D2= 20 "

D3= 30 "

D4= 40 "

D5= 50 "

Factor C: genotipos, con cuatro niveles

G1= Selección AN-V1

G2= Selección AN-V3

G3= Selección AN-V5

G4= Selección AN-TV6

Análisis Estadístico

Análisis de Varianza y Pruebas de Rango Múltiple

Para el presente experimento se planteó una precisión de 0.05 (95 por ciento de confiabilidad), considerada como adecuada para lo que se pretendió realizar y obtener. Con la información obtenida se procedió a realizar los análisis de varianza para las variables producción de brotes, peso seco de brotes y número de brotes, así como también para los parámetros fisiotécnicos: TAN, ICC, TCC,

TRC e IAF. Para aquellas variables y parámetros donde se detectaron diferencias significativas en los diferentes factores e interacciones en estudio, se procedió a realizar una prueba de rango múltiple mediante Duncan $\alpha=0.05$. Para efectuar dichos análisis se utilizó el paquete estadístico computacional denominado Statistical Analysis System (SAS).

Análisis de Correlación Fenotípica

Para conocer la relación de PS, ICC, TCC, TRC e IAF con la TAN, se realizó un análisis de correlación fenotípica basados en las medias de parcelas el cual posteriormente se utilizó para llevar a cabo el análisis de coeficientes de sendero, considerando que estos parámetros posiblemente sean componentes causales de la TAN o eficiencia fisiológica de los genotipos; tanto el análisis de correlación como el de sendero; se realizaron de manera independiente para cada genotipo, ya que desde el inicio se realizaron las operaciones de estimación de área foliar en base a un modelo o ecuación determinada para cada genotipo, lo cual dió como resultado datos diferentes para cada parámetro fisiotécnico en cada uno de los genotipos en estudio. Este análisis también se realizó con el paquete estadístico computacional denominado Statistical Analysis System (SAS).

Análisis de Sendero

El análisis de sendero requiere la obtención de efectos directos y efectos indirectos para cuantificar las vías en el diagrama causal. Los efectos directos los estiman los coeficientes parciales de regresión estandarizados de las variables. Los efectos indirectos, son estimados a partir de productos de coeficientes de correlación por coeficientes de regresión, de tal manera que cuando denotamos una correlación, de hecho estamos englobando los efectos directos e indirectos de una variable dada:

$$r_{1,0} = b_1 + b_2 r_{1,2}$$

↖
↑

efecto directo
efecto indirecto

y lo que hace la técnica del análisis de sendero es precisamente separar a partir de una correlación, dichos efectos para una mejor visualización y comprensión de nuestro diagrama, así también esto se facilita con la construcción de un cuadro de efectos directos (en la diagonal) e indirectos que nos permita una mejor discusión de los resultados.

	X1	X2.....Xn	ri,0
X1	<u>b1</u>	b2 r1,2.....bn r1,n	r1,0
X2	b1 r1,2	<u>b2</u>bn r1,n	r2,0
....
....
Xn	b1 r1,n	b2 r2,n..... <u>bn</u>	rn,0

Como se aprecia, el sistema de análisis de senderos trabaja con ecuaciones simultáneas y al aumentar el número de variables, lógicamente aumenta la complejidad de su solución; así pues, es preferible resolver un sistema de ecuaciones simultáneas por medio de matrices, entonces lo primero será definir las matrices que engloban a las ecuaciones que se generan, así pues:

Sea A = matriz de correlaciones entre los factores básicos.

$$A = \begin{vmatrix} r_{11}, & r_{12} \dots \dots \dots r_{1n} \\ r_{21}, & r_{22} \dots \dots \dots r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{1n}, & r_{2n} \dots \dots \dots r_{nn} \end{vmatrix}$$

Sea R = vector de correlaciones entre los factores básicos y la variable de respuesta.

$$R = \begin{vmatrix} r_{10} \\ r_{20} \\ \dots \\ \dots \\ r_{n0} \end{vmatrix}$$

y sea b = vector de coeficientes de sendero.

$$b = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ \dots \\ b_n \end{vmatrix}$$

De tal manera que para obtener los coeficientes de sendero, se realizó la siguiente operación matricial:

$$b=A^{-1} * R$$

y para estimar el factor residual:

$$b_{n+1} = [1 - b^t * R^{1/2}]$$

Trabajando con matrices también se puede generar un cuadro que contemple los efectos directos e indirectos, para lo cual se definió D= matriz que contiene los b_i en la diagonal principal y ceros en las demás posiciones.

$$D = \begin{vmatrix} b_1 & 0 & 0 \dots \dots \dots 0 \\ 0 & b_2 & 0 \dots \dots \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \dots \dots \dots b_n \end{vmatrix}$$

De tal manera que se obtiene una matriz C (cuadro de efectos directos e indirectos) de la manera siguiente:

$$C = A * D$$

suponiendo que A y D contienen lo siguiente:

$$A = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{vmatrix} \quad \text{y} \quad D = \begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{vmatrix}$$

entonces:

$$A * D = C = \begin{vmatrix} b1 & b2 \ r12 \\ b1 \ r21 & b2 \end{vmatrix}$$

donde:

$b1$ y $b2$ = efectos directos.

$b2 \ r12$ y $b1 \ r21$ = efectos indirectos.

Todo el procedimiento anteriormente expuesto, debido al trabajo tan laborioso que representa para obtenerlo manualmente, se utilizó un paquete estadístico para cálculo matricial denominado MATLAB de la Universidad de Nuevo México, EUA, dicho paquete se encuentra disponible en la UAAAN.

Modelo Estadístico

Bloques completos al azar con tres factores en un arreglo de parcelas subdivididas con tres repeticiones:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \varepsilon(i1) + \beta_j + \alpha \beta_{ij} + \varepsilon(j1)_i + \lambda_k + \alpha \lambda_{ik} + \beta \lambda_{jk} + \alpha \beta \lambda_{ijk} + \varepsilon(kl)_{ij}$$

donde:

$i = 1 \dots 2$ ----- a = factor A (fertilizaciones)

$j = 1 \dots 3$ ----- b = factor B (densidades)

$k = 1 \dots 4$ ----- c = factor C (genotipos)

$l = 1 \dots 3$ ----- r = (repeticiones)

μ = Efecto de la media general

α_i = Efecto del factor A

$\varepsilon(i1)$ = Efecto del error A

β_j = Efecto del factor B

$\alpha\beta_{ij}$ = Efecto de la interacción de los factores A y B

$\varepsilon(j1)_i$ = Efecto del error B

λ_k = Efecto del factor C

$\alpha\lambda_{ik}$ = Efecto de la interacción de los factores A y C

$\beta\lambda_{jk}$ = Efecto de la interacción de los factores B y C

$\alpha\beta\lambda_{ijk}$ = Efecto de la interacción de los factores A, B y C

$\varepsilon(k1)_{ij}$ = Efecto del error C

RESULTADOS

Se presentan los resultados promedio de 12 cortes realizados semanalmente durante el período (febrero-mayo) en que se llevó a cabo el experimento, para las variables producción de brotes, peso seco de brotes y número de brotes, así como para los parámetros fisiotécnicos tasa de asimilación neta, índice de crecimiento del cultivo, tasa de crecimiento del cultivo, tasa relativa de crecimiento e índice de área foliar.

Producción de Brotes

En el análisis de varianza para esta variable, se encontraron diferencias significativas para densidades y para genotipos al nivel de 0.05 para ambos, con un coeficiente de variación de 24.56 por ciento, siendo éste un valor aceptable, el cual indica que la conducción del experimento y los resultados obtenidos son confiables; para el resto de los factores y sus interacciones, las diferencias fueron no significativas (Cuadro 4.1).

Al realizar la prueba de rango múltiple (Duncan 0.05) para los factores

densidades y genotipos, se observa como la densidad de plantación influyó de manera notable en la producción de brotes, siendo la densidad de 20 plantas/m² la que generó una mayor producción, siendo estadísticamente igual las densidades de 10 y 30 plantas/m² (Cuadro 4.2). Con respecto al factor genotipos, el más productivo fue el AN-TV6, expresando solo el potencial genético de cada uno de los materiales evaluados, ya que no se detectaron diferencias significativas con respecto a las interacciones genotipos por fertilizaciones, genotipos por densidades y respecto a las interacciones genotipos por fertilizaciones, genotipos por densidades y genotipos por densidades por fertilizaciones, que pudiera indicarnos una relación con respecto a los niveles de fertilización y las diferentes densidades estudiadas (Cuadro 4.3). Aún cuando no se encontraron diferencias significativas en la interacción de los tres factores (fertilizaciones, densidades y genotipos), en la Figura 4.1, se observa el comportamiento de dicha interacción para la variable producción de brotes.

Peso Seco de Brotes

En el análisis de varianza efectuado para esta variable, se encontraron diferencias significativas con respecto a los factores densidades y genotipos al nivel de 0.05 para ambos, con un coeficiente de variación de 20.75 por ciento, valor adecuado y confiable para la conducción del experimento. Para el resto de factores e interacciones no se detectaron diferencias significativas (Cuadro 4.1).

En la prueba de rango múltiple (Duncan 0.05) efectuada, se observa que las densidades de 10 y 20 plantas/m² influyeron notoriamente en esta variable, presentando un comportamiento estadísticamente igual la densidad de 30 plantas/ m² (Cuadro 4.2). En lo que respecta al factor genotipos, el AN-TV6, se presenta como superior con respecto a los demás, el AN-V1 presenta comportamiento estadístico igual que el AN-TV6 (Cuadro 4.3). Aún cuando no se detectaron diferencias significativas en la interacción de los tres factores en estudio, en la Figura 4.2, se observa el comportamiento de ésta variable con respecto a dicha interacción.

Número de Brotes

Al igual que las variables anteriormente descritas, en el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas para los factores densidades al nivel de 0.05 y para genotipos al nivel de 0.01, presentando un coeficiente de variación de 22.16 por ciento, valor confiable, indicando una buena conducción experimental. Para el factor fertilizaciones e interacciones, no se detectaron diferencias significativas con respecto a esta variable (Cuadro 4.1).

En la prueba de rango múltiple (Duncan 0.05) para el factor densidades, la densidad de 20 plantas/m² fue la que influyó de manera notable sobre el número

de brotes y de hecho presentan un comportamiento similar con respecto a la producción de brotes (Cuadro 4.2). En lo que respecta al factor genotipos, el AN-TV6 y el AN-V1, se presentan como superiores para esta variable, así también, los genotipos AN-V3 y AN-V5, presentan un comportamiento estadísticamente igual, pero inferior numericamente a los genotipos AN-TV6 y AN-V1 (Cuadro 4.3). Aún cuando no se encontraron diferencias significativas en la interacción de los tres factores en estudio, en la Figura 4.3, se representa esta variable con respecto a dicha interacción.

Cuadro 4.1. Análisis de Varianza (cuadrados medios) para Producción Peso Seco y Número de Brotes.

F.V.	G.L.	PRODUCCION DE BROTOS	PESO SECO DE BROTOS	NUMERO DE BROTOS
REP	2	2329004.57 **	6985.07 **	112.13 NS
FERTILIZACION	1	5489529.63 NS	14300.83 NS	520.83 NS
ERROR (A)	2	323545.16	1012.30	60.23
DENSIDAD	4	2164718.74 *	3870.53 *	214.14 **
DEN*FERT.	4	408955.46 NS	849.41 NS	41.72 NS
ERROR (B)	16	471590.93	998.43	48.38
GENOTIPO	3	4920634.72 **	8964.46 **	578.25 **
GEN*FERT.	3	317140.59 NS	1081.65 NS	18.34 NS
GEN*DEN.	12	176554.51 NS	466.49 NS	17.26 NS
GEN*DEN*FERT.	12	84007.45 NS	384.60 NS	8.71 NS
ERROR (C)	60	355144.48	706.71	43.008
TOTAL	119			
C.V.		24.56 %	20.76 %	22.16 %

* Significancia al 0.05 ** Significancia al 0.01 NS= No Significativo C. V.= Coeficiente de Variación

Cuadro 4.2. Prueba de Rango Múltiple (Duncan 0.05) para Producción, Peso Seco y Número de Brotes considerando el factor densidades de plantación.

DENSIDAD plantas/m ²	PRODUCCION DE BROTES (g)	PESO SECO DE BROTES (g)	NUMERO DE BROTES
10	2576.4 a b	138.45 a	31.292 a b
20	2838.6 a	142.87 a	33.583 a
30	2436.0 a b c	128.12 a b	29.500 a b c
40	2098.8 c	114.29 b	26.083 c
50	2179.5 b c	116.75 b	27.458 b c
VALOR DUNCAN	462.4	21.28	4.68

Valores con misma literal, son estadísticamente iguales.

Cuadro 4.3. Prueba de Rango Múltiple (Duncan 0.05) para Producción, Peso Seco y Número de Brotes considerando el factor genotipos.

GENOTIPOS	PRODUCCION DE BROTES (g)	PESO SECO DE BROTES (g)	NUMERO DE BROTES
AN-V1	2527.2 b	134.56 a b	32.60 a
AN-V3	2358.8 b	126.30 b	26.33 b
AN-V5	1920.5 c	105.26 c	25.33 b
AN-TV6	2896.9 a	146.26 a	34.06 a
VALOR DUNCAN	334.3	14.91	3.67

Valores con misma literal son estadísticamente iguales.

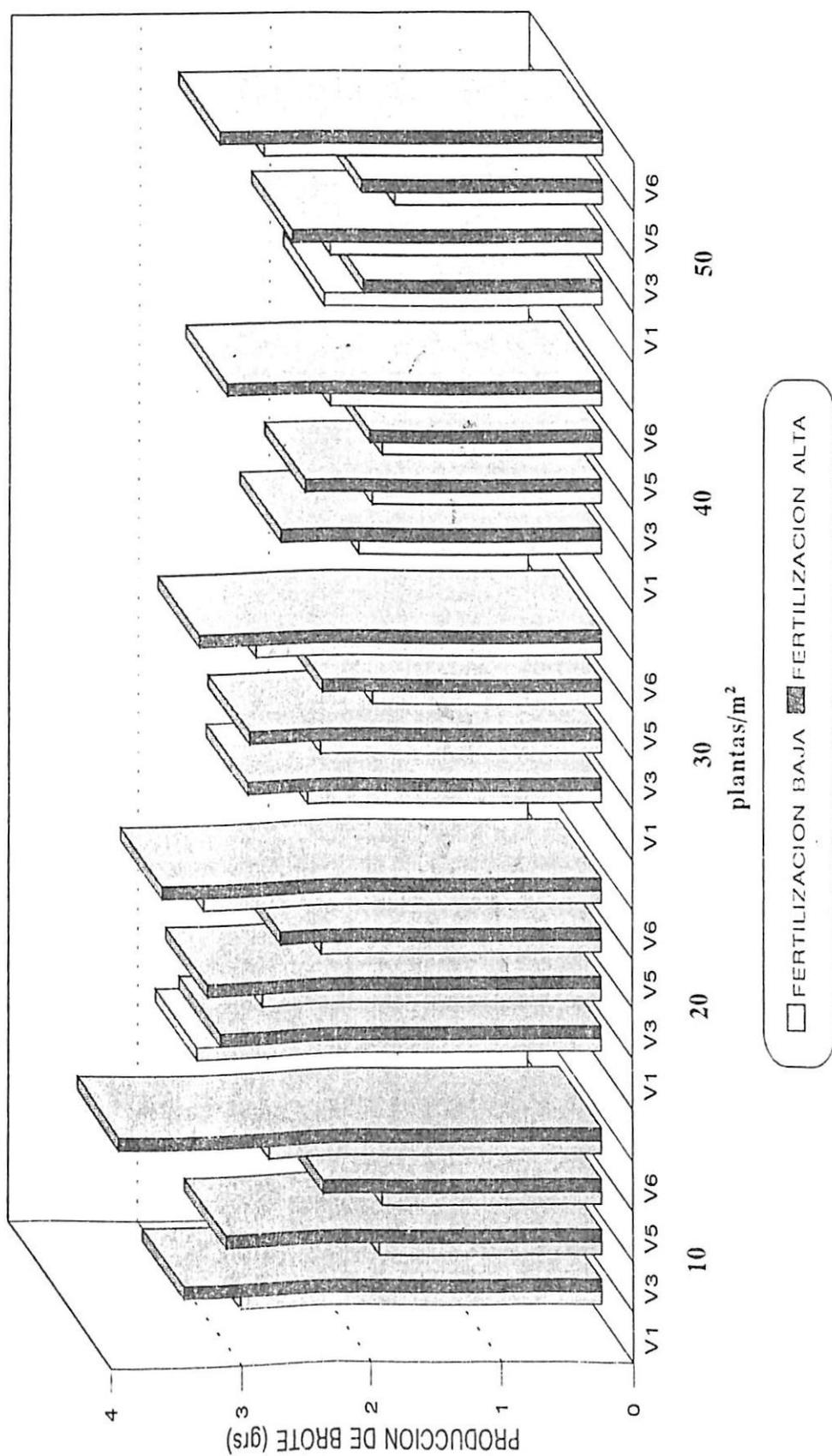


Figura 4.1. Producción de Brotes considerando la interacción Genotipo-Densidad-Fertilización.

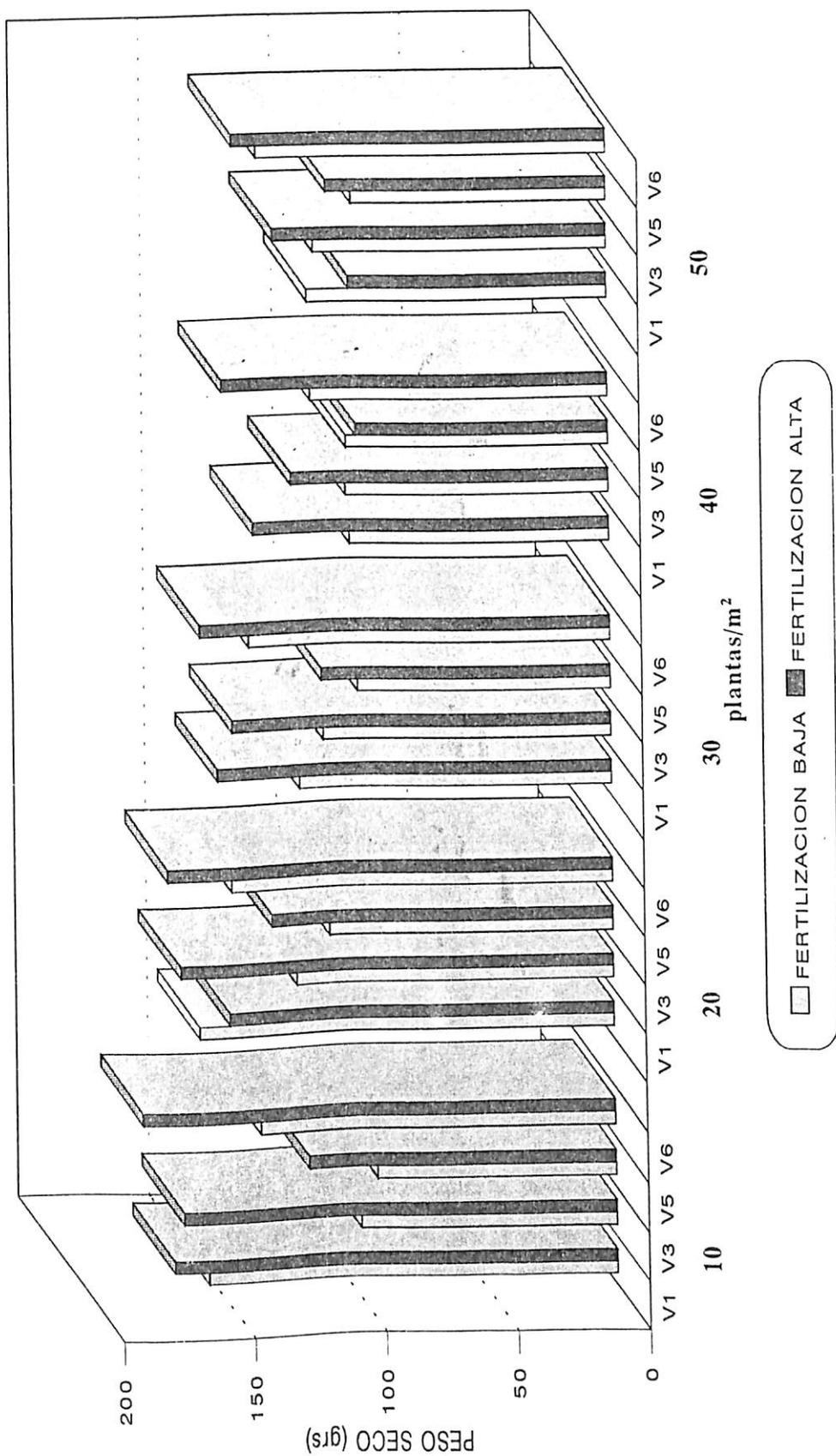


Figura 4.2. Peso Seco de Brotes considerando la interacción Genotipo-Densidad-Fertilización.

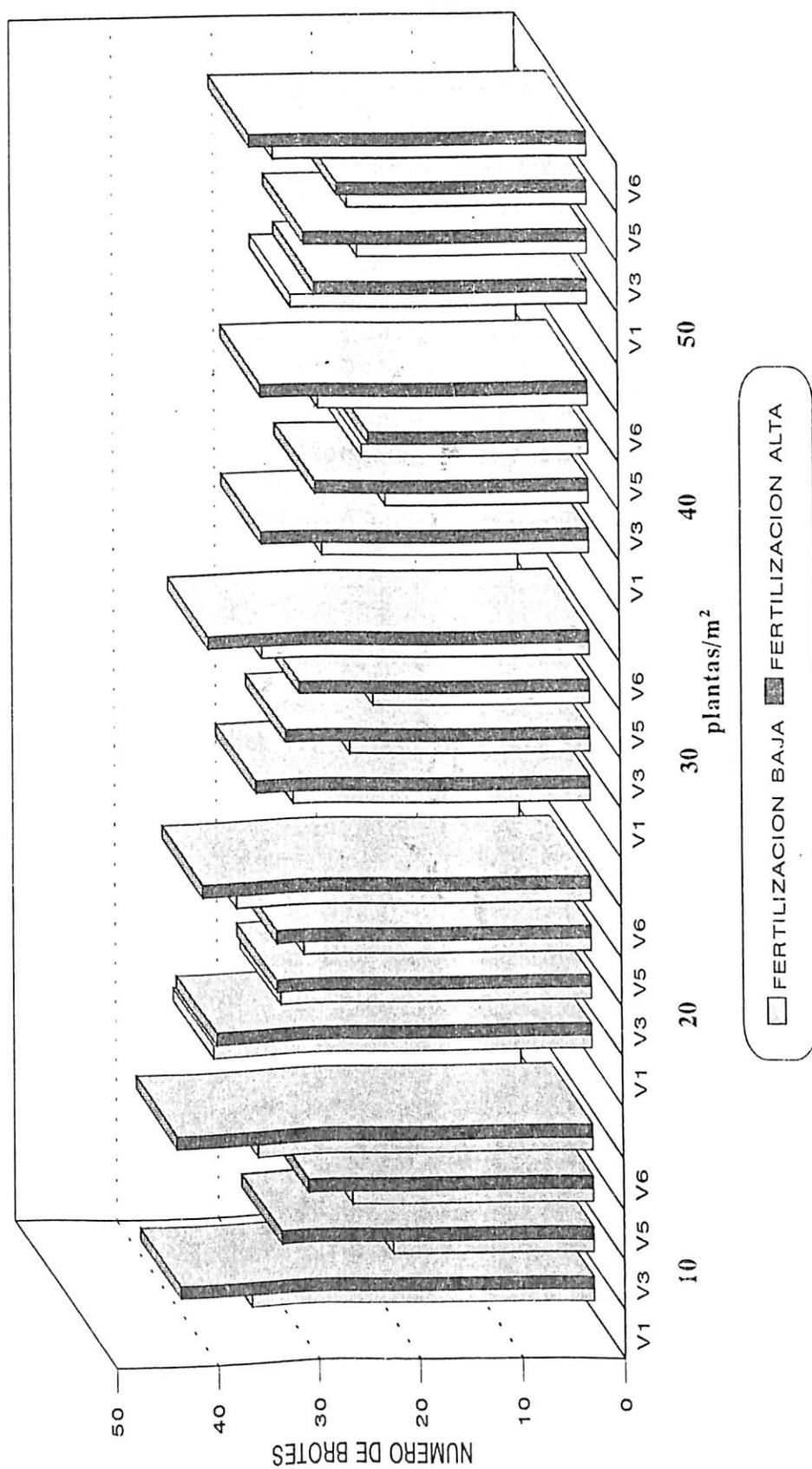


Figura 4.3. Numero de Brotes considerando la interacción Genotipo-Densidad-Fertilización.

Parámetros Fisiotécnicos

En los análisis de varianza efectuados para los parámetros fisiotécnicos estudiados, se encontró que en la Tasa de Asimilación Neta (TAN), solo se detectaron diferencias significativas con respecto a la interacción genotipos por densidades al nivel de 0.05, con un coeficiente de variación de 28.58 por ciento, considerado como adecuado y confiable. Para el resto de los factores en estudio, así como para sus interacciones, no se encontraron diferencias significativas (Cuadro 4.4).

El parámetro Índice de Crecimiento del Cultivo (ICC) solo presentó diferencias significativas para el factor fertilizaciones al nivel de 0.05, con un coeficiente de variación de 33.06 por ciento. En el resto de los factores y sus interacciones no presentaron diferencias significativas con respecto a este parámetro (Cuadro 4.4).

Para Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) se detectaron diferencias significativas en los factores fertilizaciones y genotipos al nivel de 0.05 para ambos, con un coeficiente de variación de 33.14 por ciento. Para el resto de factores e interacciones no se encontraron diferencias significativas (Cuadro 4.4).

En lo que respecta a Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), se encontraron

diferencias significativas para la interacción genotipos por densidades por fertilizaciones al nivel de 0.05, con un coeficiente de variación de 54.59 por ciento; mientras que para los factores y resto de interacciones no se detectaron diferencias significativas (Cuadro 4.4).

El parámetro Índice de Área Foliar (IAF), mostró diferencias significativas para los factores densidades y genotipos al nivel de 0.01 para ambos y en la interacción genotipos por densidades al nivel de 0.05; con un coeficiente de variación de 18.97 por ciento (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Análisis de Varianza (cuadrados medios) para los parámetros fisiotécnicos: TAN, ICC, TCC, TRC e IAF.

F.V.	G.L.	TAN	ICC	TCC	TRC	IAF
REP	2	0.00000022 NS	0.00000044 NS	0.01687938 *	0.00014480 NS	0.00139392 NS
FERTILIZACION	1	0.00000034 NS	0.00000018 *	0.00788941 *	0.00009774 NS	0.00397901 NS
ERROR (A)	2	0.00000009	0.00000001	0.00035652	0.00004320	0.00022866
DENSIDAD	4	0.00000026 NS	0.00000062 NS	0.00788827 NS	0.00028984 NS	0.35214325 **
DEN*FERT	4	0.00000012 NS	0.00000002 NS	0.00166239 NS	0.00007895 NS	0.00292651 NS
ERROR (B)	16	0.00000020	0.00000066	0.00425415	0.00020018	0.00327454
GENOTIPO	3	0.00000042 NS	0.00000015 NS	0.01257586 *	0.00009368 NS	0.01155280 **
GEN*FERT	3	0.00000001 NS	0.00000034 NS	0.00570319 NS	0.00006050 NS	0.00248693 NS
GEN*DEN	12	0.00000037 *	0.00000027 NS	0.00461465 NS	0.00017980 NS	0.00444892 *
GEN*DEN*FERT	12	0.00000015 NS	0.00000035 NS	0.00492691 NS	0.00028696 *	0.00315711 NS
ERROR (C)	60	0.00000017	0.00000039	0.00465384	0.00013794	0.00211170
TOTAL	119					
C.V.		28.58 %	33.06 %	33.14 %	54.59 %	18.97 %

* Significancia al 0.05

** Significancia al 0.01

NS= No Significativo

C.V.= Coeficiente de Variación

Al realizar la prueba de rango múltiple (Duncan 0.05) para el parámetro Tasa de Asimilación Neta (TAN) en la interacción genotipo por densidad, se encontró que la interacción de 30 plantas/m² y el genotipo AN-V1 fue estadísticamente superior al resto de las interacciones; las interacciones 40 y 50 plantas/m² y genotipo AN-TV6 presentan un agrupamiento estadístico a la interacción superior (Cuadro 4.5). En las Figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se representa gráficamente el comportamiento de la TAN, con respecto a la interacción genotipo por densidad.

Cuadro 4.5. Prueba de Rango Múltiple (Duncan 0.05) para TAN e IAF, considerando la interacción de los factores densidad x genotipo.

DENSIDAD (plantas/m ²)	GENOTIPO	TASA DE ASIMILACION NETA (mg/cm ² /día ⁻¹)	INDICE DE AREA FOLIAR
10	AN-V1	0.00135 c	0.08145 j
	AN-V3	0.00138 b c	0.10083 i
	AN-V5	0.00118 c	0.07745 i
	AN-TV6	0.00141 b c	0.07615 i
20	AN-V1	0.00133 c	0.16930 h
	AN-V3	0.00156 b c	0.16741 h
	AN-V5	0.00126 c	0.15800 h
	AN-TV6	0.00153 b c	0.15621 h
30	AN-V1	0.00213 a	0.26253 f g
	AN-V3	0.00130 c	0.28198 e f g
	AN-V5	0.00126 b c	0.24218 g
	AN-TV6	0.00146 b c	0.24356 g
40	AN-V1	0.00118 c	0.29176 d e f g
	AN-V3	0.00126 c	0.33978 c d e
	AN-V5	0.00130 c	0.34841 c d
	AN-TV6	0.00191 a b	0.29436 d e f g
50	AN-V1	0.00121 c	0.30726 d e f
	AN-V3	0.00146 b c	0.44216 a
	AN-V5	0.00126 c	0.41928 a b
	AN-TV6	0.00163 a b, c	0.38343 b, c
VALOR DUNCAN		0.000168	0.018760

Valores con misma literal son estadísticamente iguales.

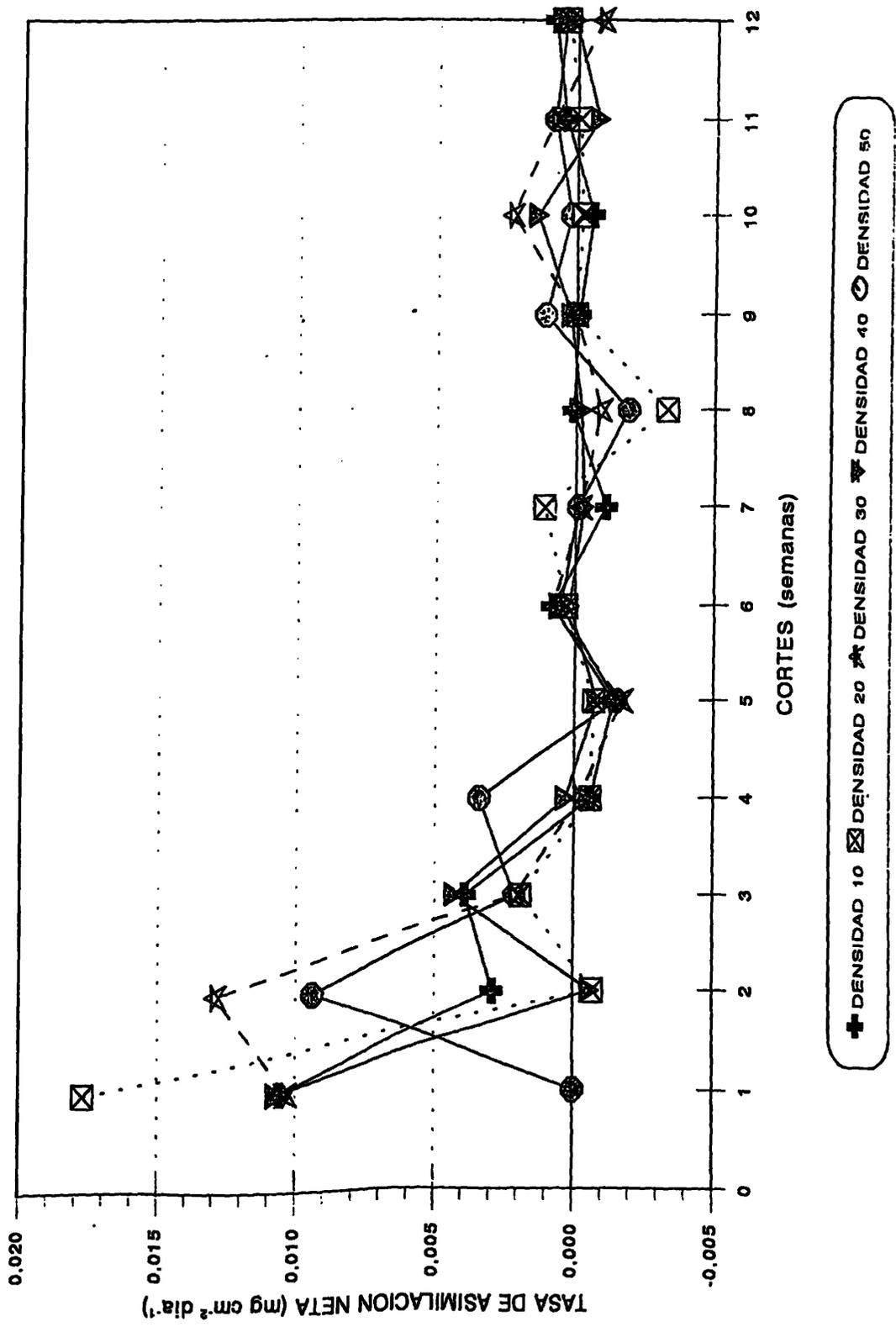


Figura 4.4. Tasa de Asimilación Neta para AN-V1, considerando la interacción Genotipo-Densidad.

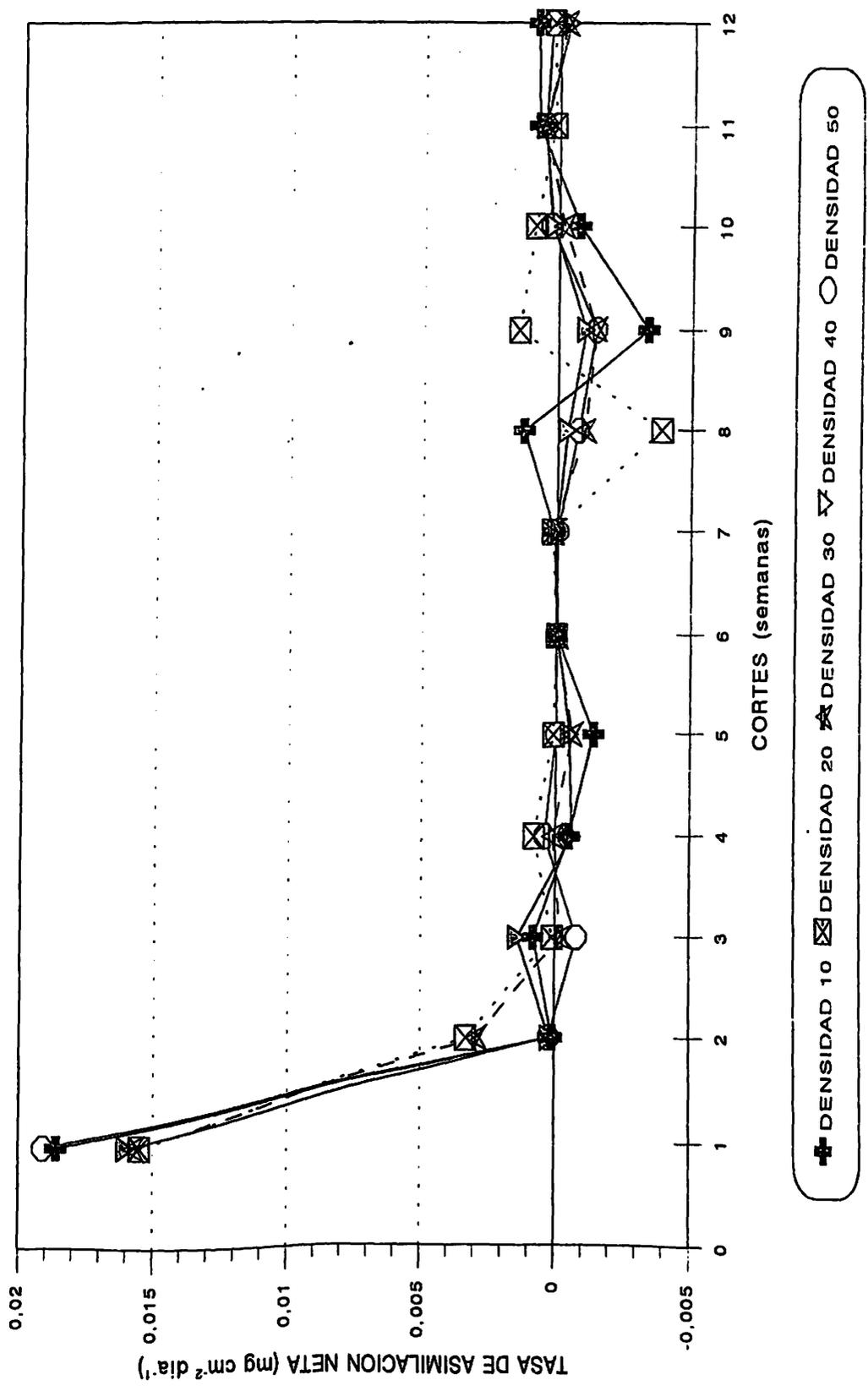


Figura 4.5. Tasa de Asimilación Neta para AN-V3, considerando la interacción Genotipo-Densidad.

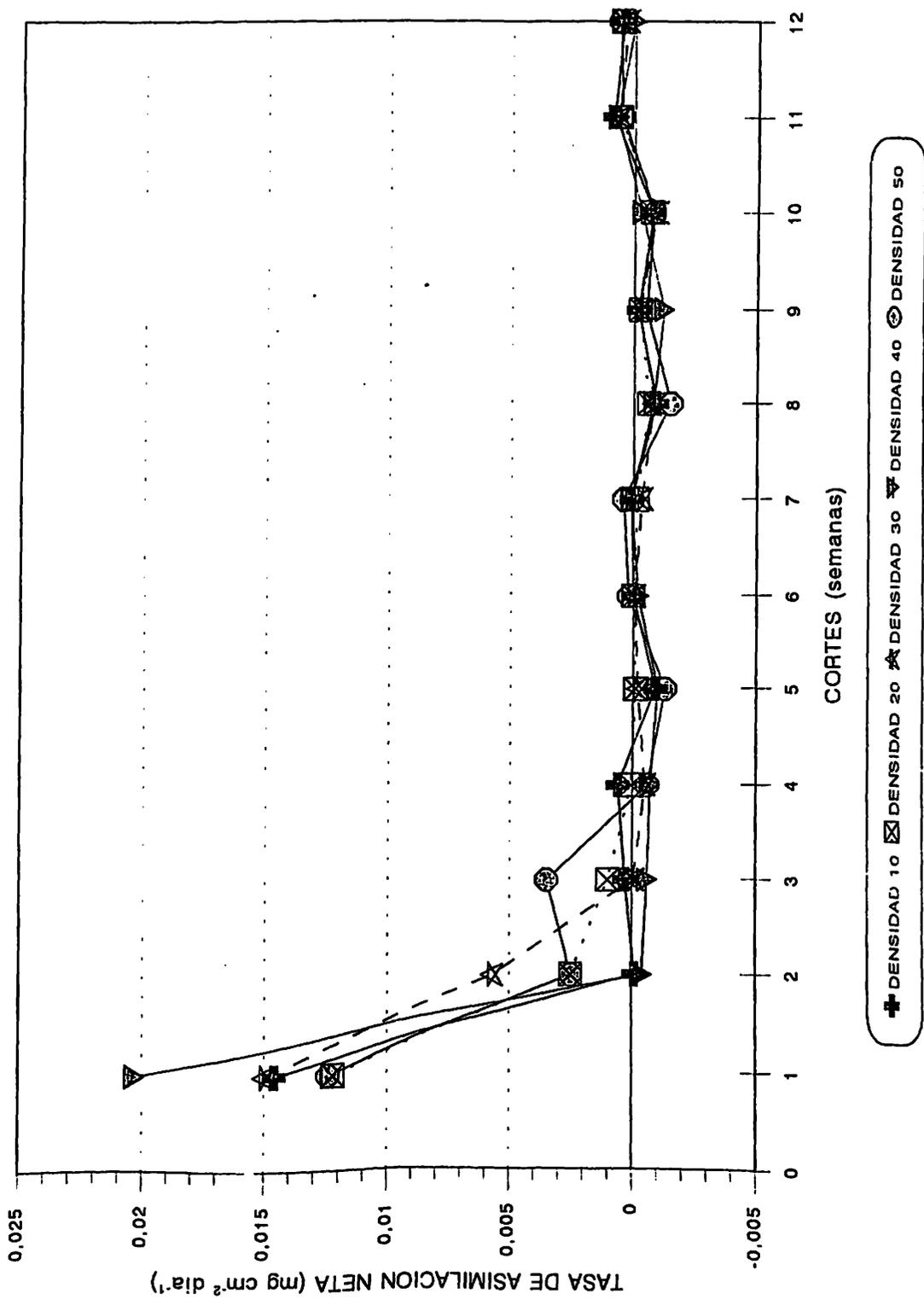


Figura 4.6. Tasa de Asimilación Neta para AN-V5, considerando la interacción Genotipo-Densidad.

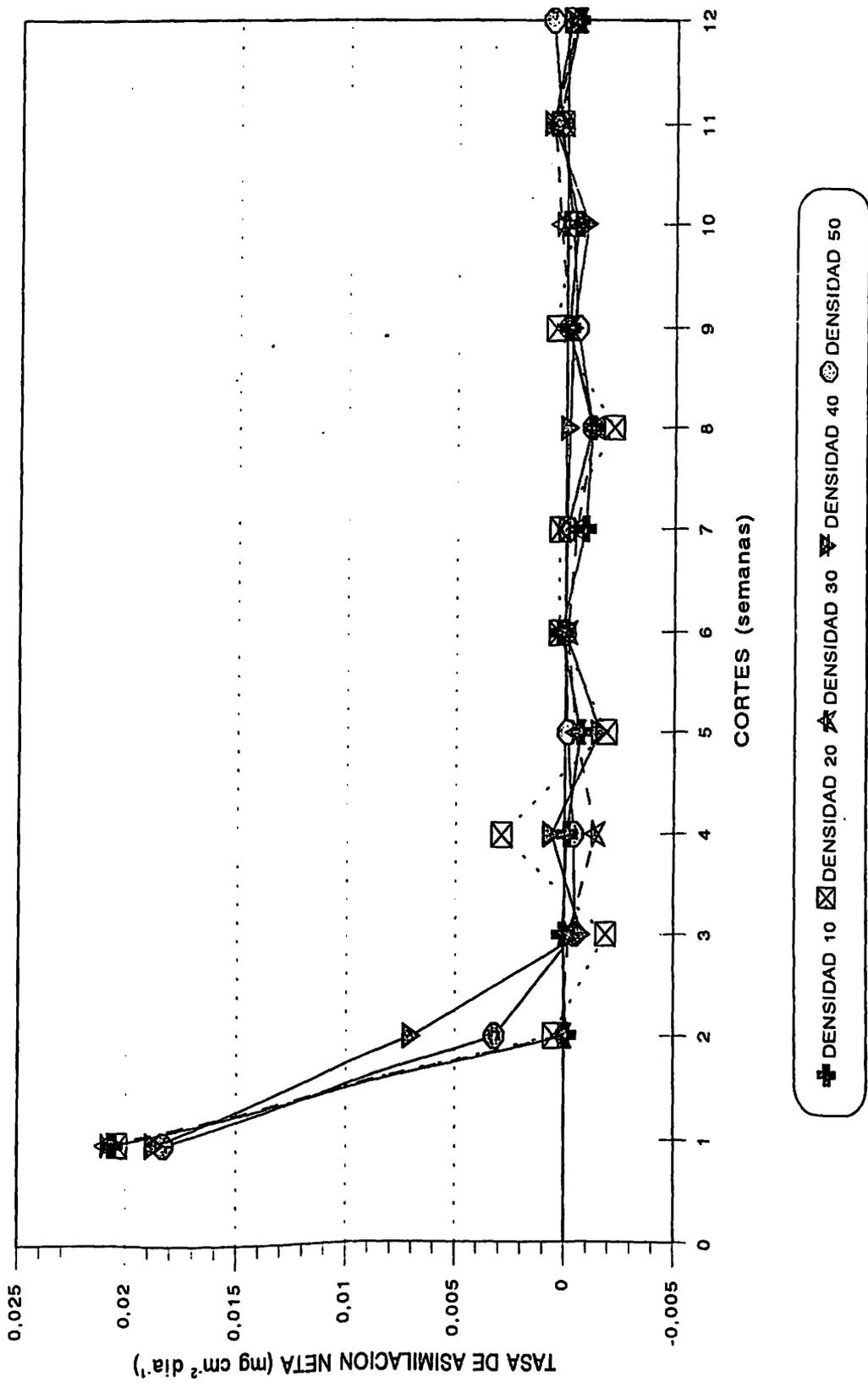


Figura 4.7. Tasa de Asimilación Neta para AN-TV6, considerando la interacción Genotipo-Densidad.

En la prueba de rango múltiple efectuada (Duncan 0.05) para el parámetro Índice de Crecimiento del Cultivo (ICC), se encontró que el nivel de fertilización alta fue superior para este parámetro con respecto al otro nivel de fertilización (Cuadro 4.6). Gráficamente el comportamiento de este parámetro a través de los niveles de fertilización, se representa en la Figura 4.8.

Cuadro 4.6. Prueba de Rango Múltiple (Duncan 0.05) para ICC y TCC, considerando los niveles del factor fertilizaciones.

NIVEL DE FERTILIZACION	INDICE DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO (g/cm ² /día ⁻¹)	TASA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO (g/día ⁻¹)
BAJA	0.0018617 b	0.19773 b
ALTA	0.0019383 a	0.21395 a
VALOR DUNCAN	0.0000728	0.0148

En la prueba de rango múltiple efectuada (Duncan 0.05) para el parámetro Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) en el factor fertilizaciones, el nivel considerado como fertilización alta fue superior para éste (Cuadro 4.6). Con respecto al factor genotipos, el que presentó superioridad para éste parámetro fue el AN-V3 y con agrupamiento estadístico igual, el AN-V5 (Cuadro 4.7). En las Figuras 4.9 y 4.10, se observa gráficamente el comportamiento de éste parámetro, considerando los factores genotipos y fertilizaciones, respectivamente.

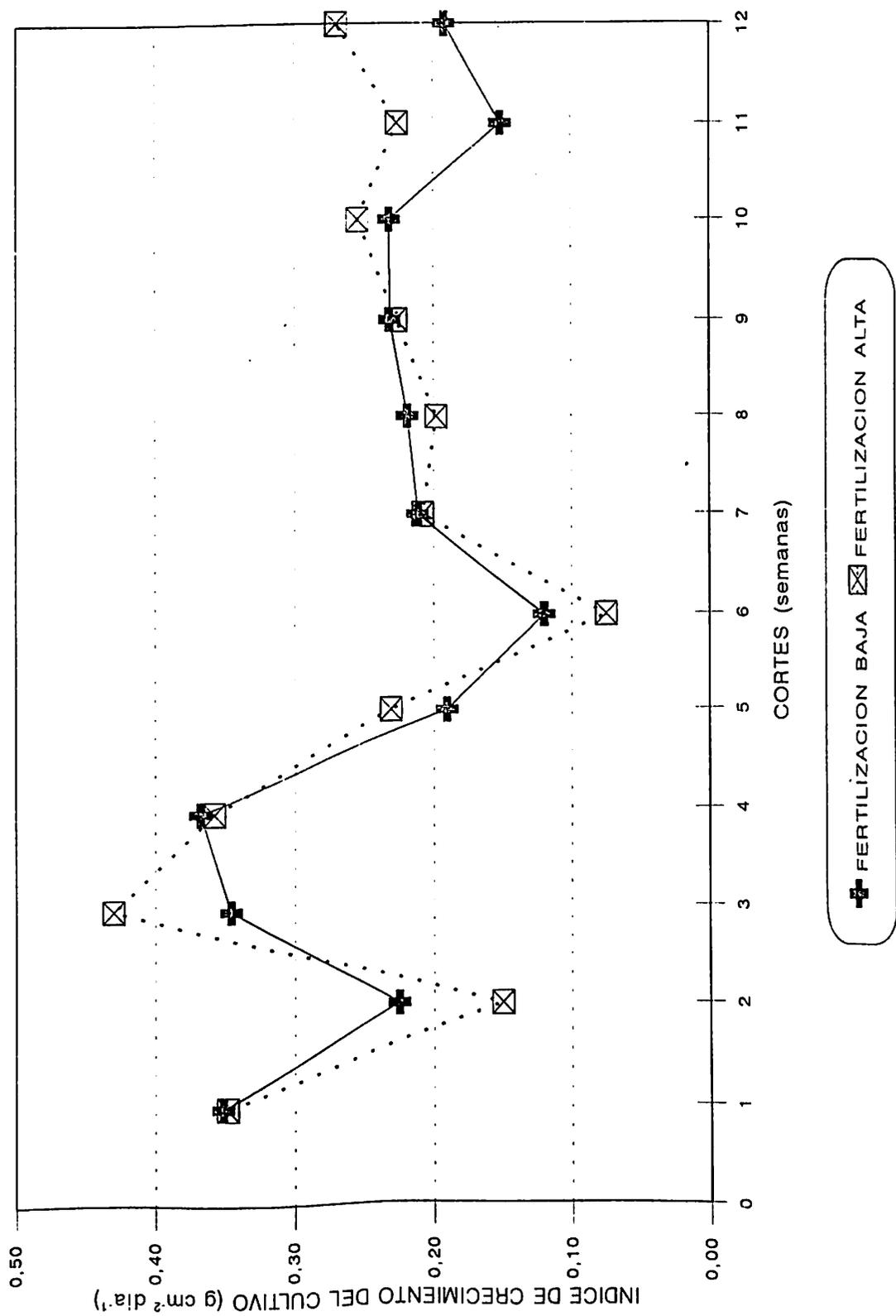


Figura 4.8. Índice de Crecimiento del Cultivo considerando los niveles de fertilización.

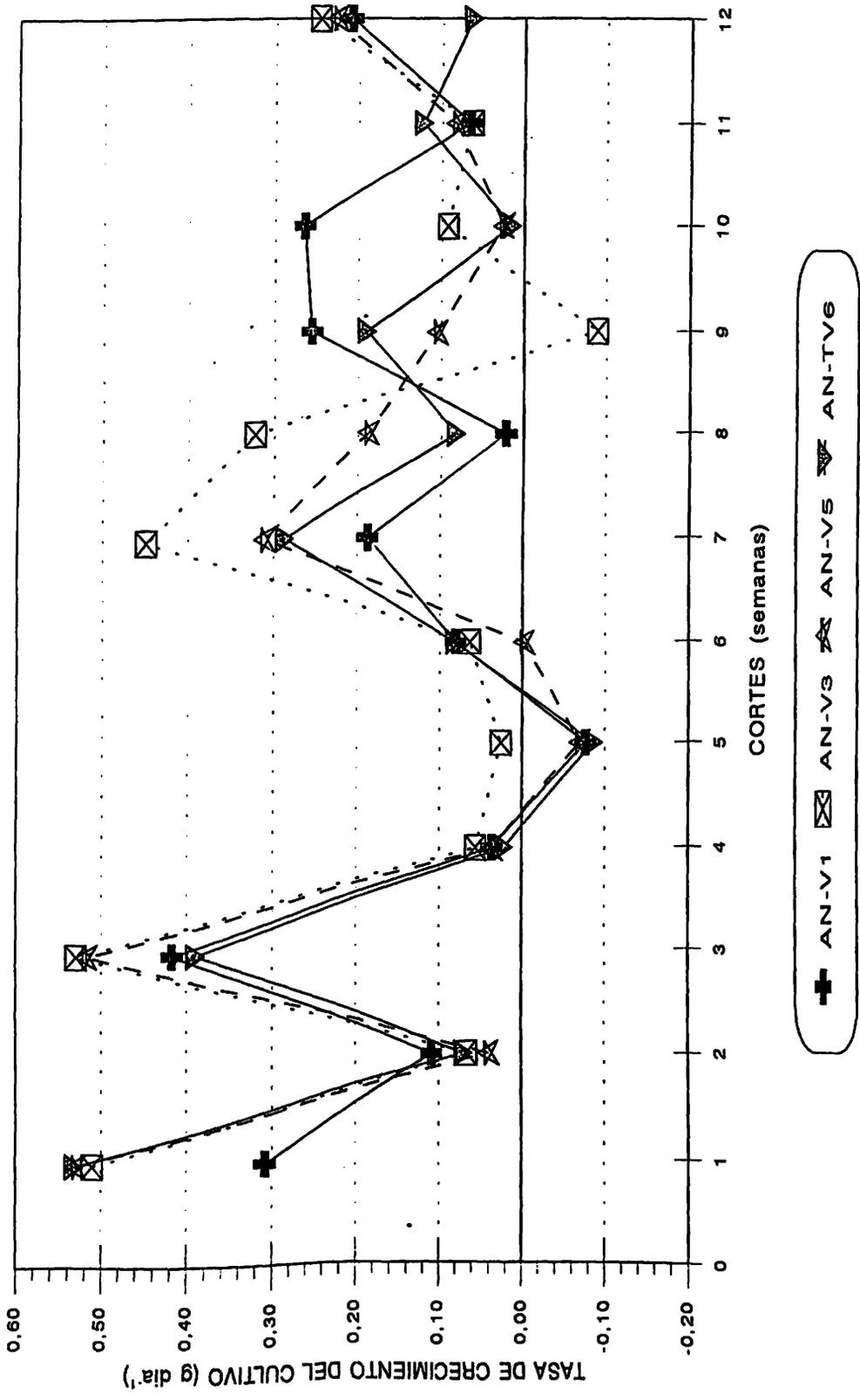


Figura 4.9. Tasa de Crecimiento del Cultivo considerando los genotipos en estudio.

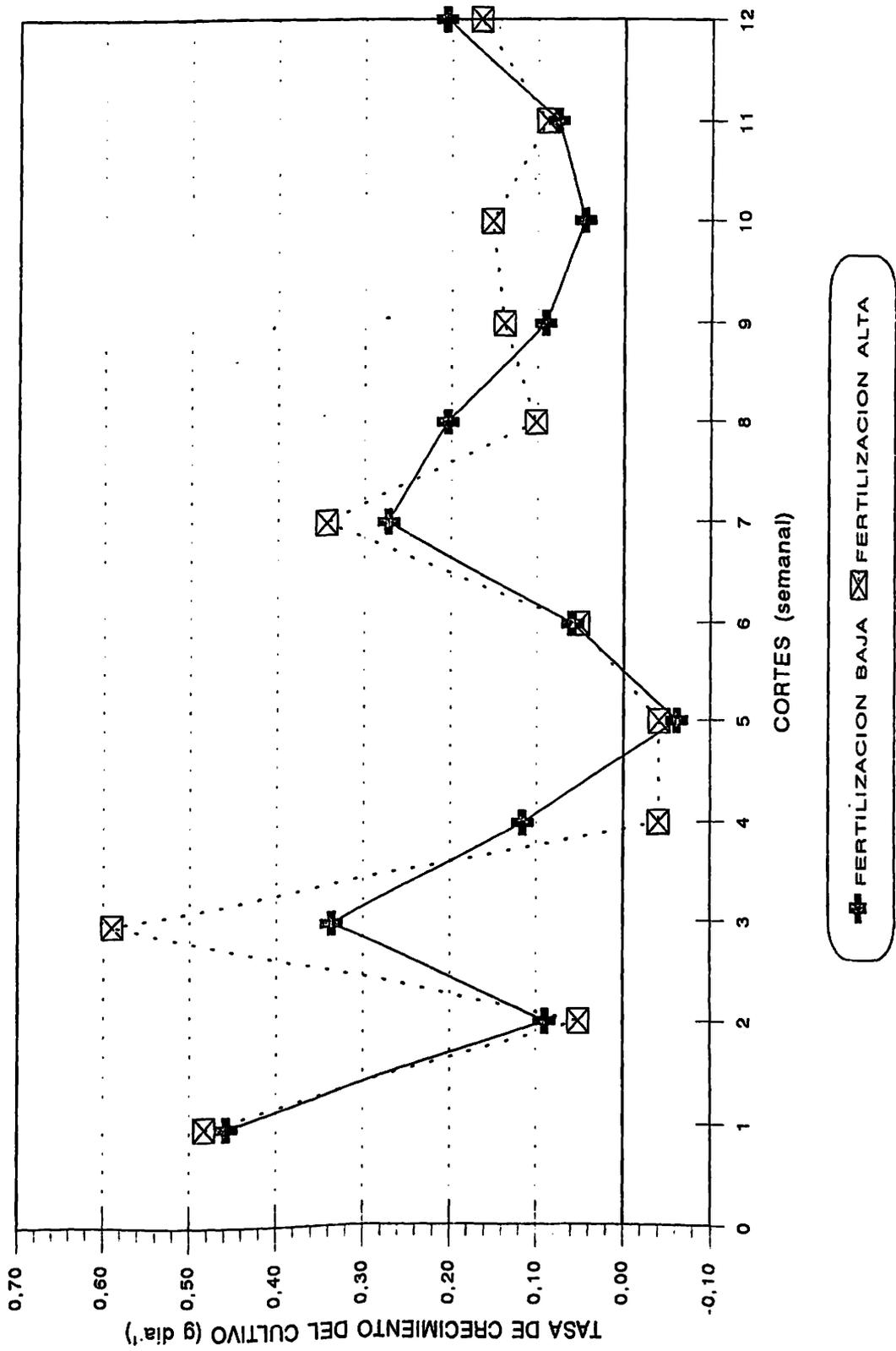


Figura 4.10. Tasa de Crecimiento del Cultivo considerando los niveles de fertilización.

Cuadro 4.7. Prueba de Rango Múltiple (Duncan 0.05) para TCC e IAF, considerando el factor genotipos.

GENOTIPO	TASA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO (g/día ⁻¹)	INDICE DE AREA FOLIAR
AN-V1	0.1962 b	0.2225 c
AN-V3	0.2344 a	0.2664 a
AN-V5	0.2056 a b	0.2491 a b
AN-TV6	0.1871 b	0.2307 b c
VALOR DUNCAN	0.0383	0.0258

Valores con misma literal son estadísticamente iguales.

Al realizar la prueba de rango múltiple (Duncan 0.05) para el parámetro Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), en la interacción genotipos por densidades por fertilización, se encontró que las interacciones, fertilización baja densidad 40 y genotipo AN-V3 y fertilización alta densidad 40 y genotipo AN-V1, son superiores al resto de las interacciones triples, además, presentan agrupamiento estadístico igual las interacciones baja-10-AN-V5; baja-30-AN-V1; baja-30-AN-TV6; baja-40-AN-V1; baja-50-AN-V5; baja-50-AN-TV6; alta-10-AN-V3; alta-20-AN-V3, alta-20-AN-V5; alta-30-AN-V3; alta-30-AN-V5; alta-40-AN-V5; alta-50-AN-V1; alta-50-AN-V3 y alta-50-AN-TV6 (Cuadro 4.8). En las Figuras 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14, se observa el comportamiento de este parámetro con respecto a los factores, genotipos, densidades y fertilizaciones.

Cuadro 4.8. Prueba de Rango Múltiple (Duncan 0.05) para TRC, considerando la interacción de los factores fertilizaciones, densidades y genotipos.

NIVEL DE FERTILIZACION	DENSIDAD (plantas/m ²)	GENOTIPO	TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO (g/g ⁻¹ /dia ⁻¹)
B	10	AN-V1	0.01566 b
		AN-V3	0.01300 b
		AN-V5	0.02216 a b
		AN-TV6	0.01566 b
A	20	AN-V1	0.01756 b
		AN-V3	0.01976 b
		AN-V5	0.01300 b
		AN-TV6	0.01326 b
J	30	AN-V1	0.02900 a b
		AN-V3	0.01206 b
		AN-V5	0.01193 b
		AN-TV6	0.03233 a b
A	40	AN-V1	0.02910 a b
		AN-V3	0.04376 a
		AN-V5	0.01780 b
		AN-TV6	0.01876 b
	50	AN-V1	0.01373 b
		AN-V3	0.01883 b
		AN-V5	0.02476 a b
		AN-TV6	0.03030 a b
A	10	AN-V1	0.01620 b
		AN-V3	0.02786 a b
		AN-V5	0.01620 b
		AN-TV6	0.01733 b
L	20	AN-V1	0.01666 b
		AN-V3	0.02340 a b
		AN-V5	0.02433 a b
		AN-TV6	0.01960 b
T	30	AN-V1	0.01843 b
		AN-V3	0.02800 a b
		AN-V5	0.02116 a b
		AN-TV6	0.01476 b
A	40	AN-V1	0.04360 a
		AN-V3	0.01490 b
		AN-V5	0.02493 a b
		AN-TV6	0.01356 b
	50	AN-V1	0.02283 a b
		AN-V3	0.03353 a b
		AN-V5	0.01756 b
		AN-TV6	0.03340 a b
VALOR DUNCAN			0.006780

Valores con misma literal son estadísticamente iguales.

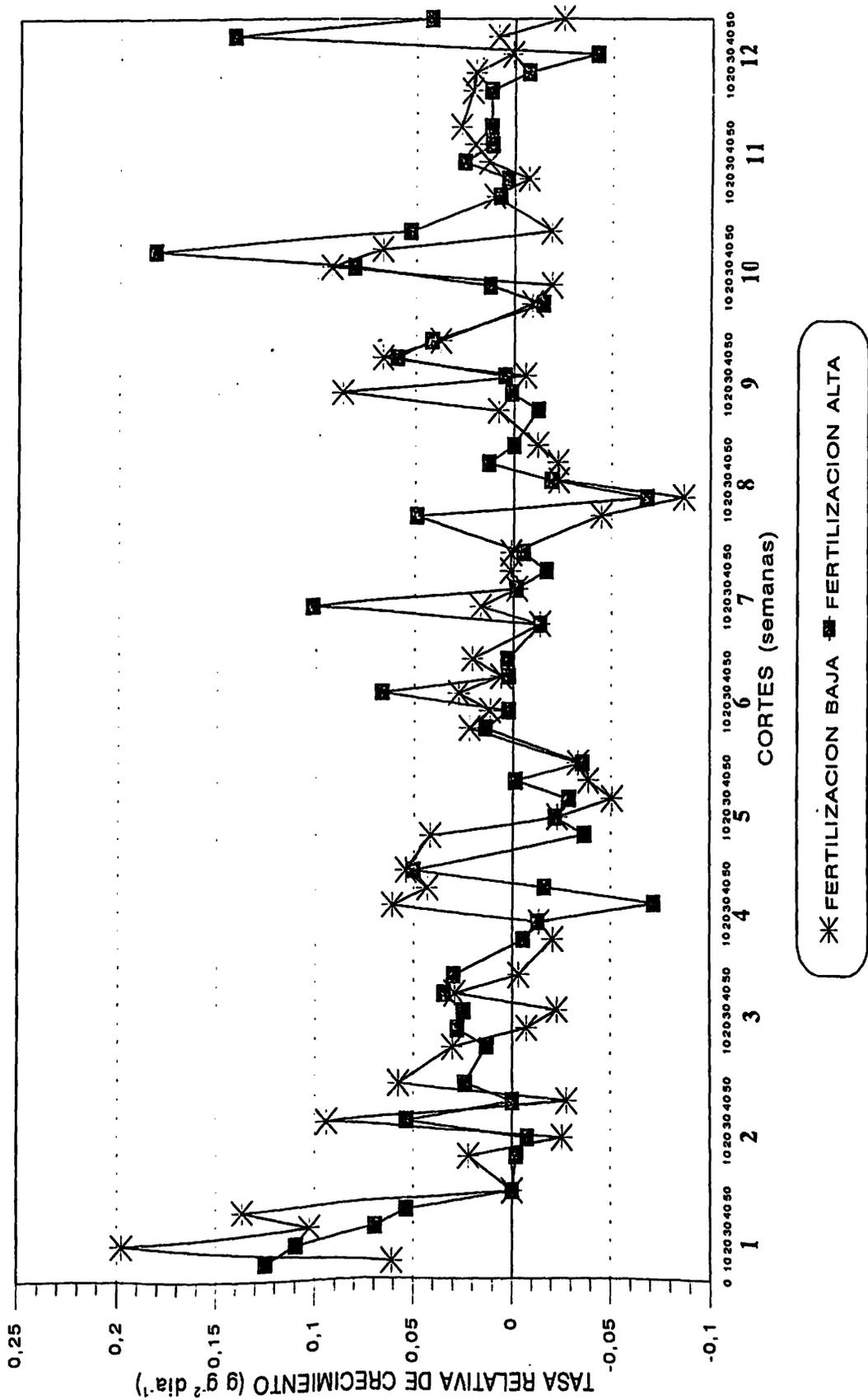


Figura 4.11. Tasa Relativa de Crecimiento para AN-VI, considerando la interacción Genotipo-Densidad-Fertilización.

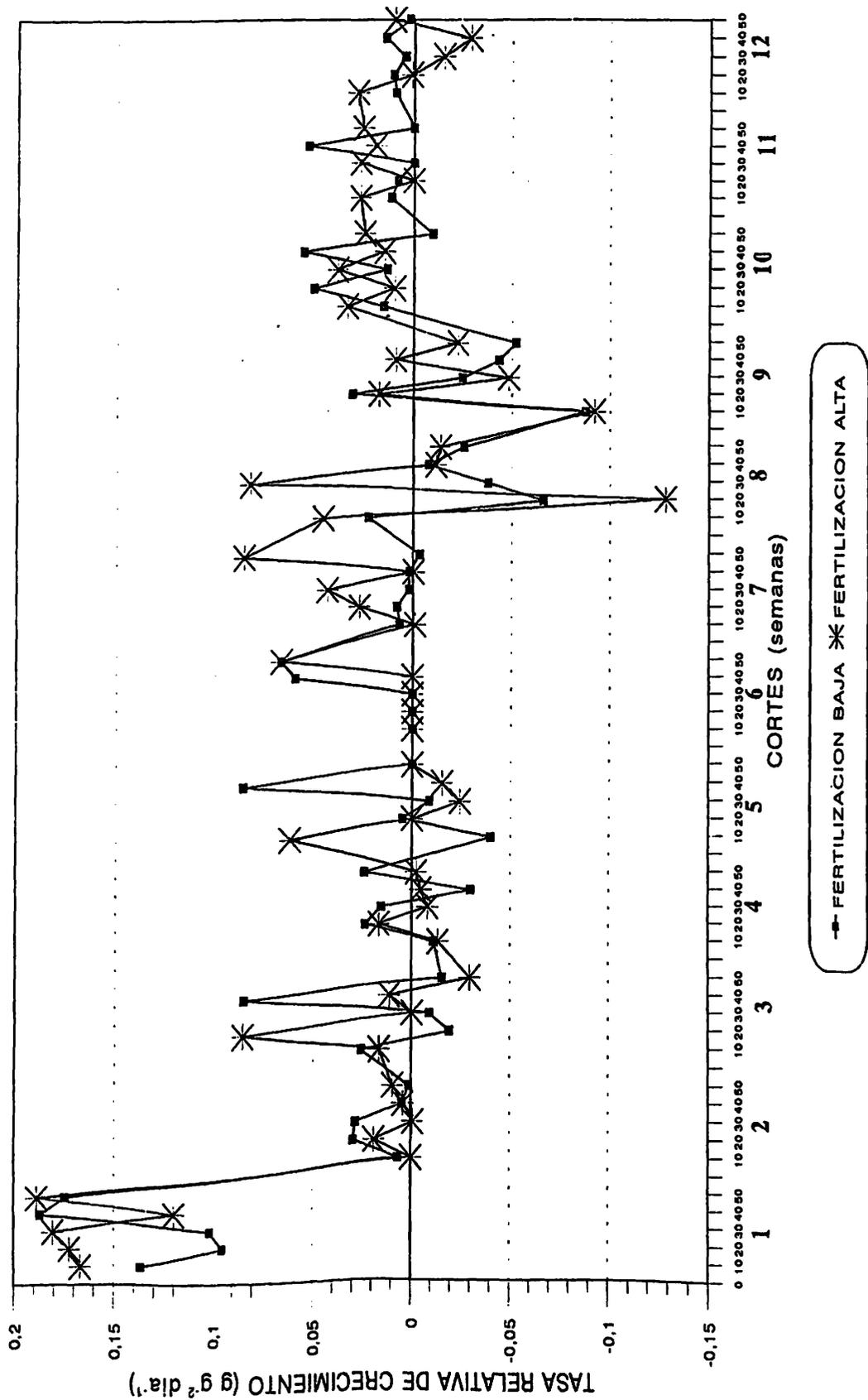


Figura 4.12. Tasa Relativa de Crecimiento para AN-V3, considerando la interacción Genotipo-Densidad-Fertilización.

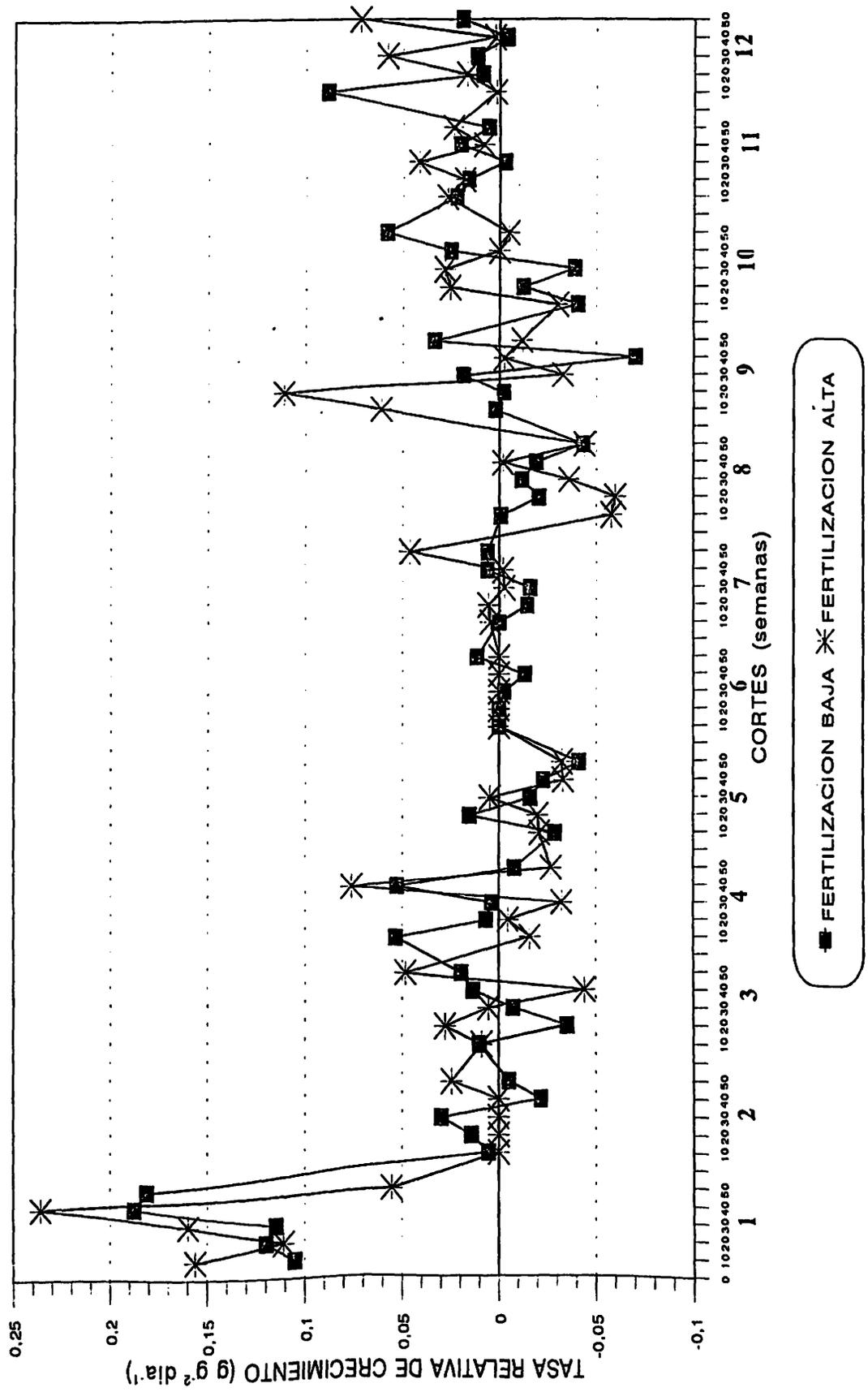


Figura 4.13. Tasa Relativa de Crecimiento para AN-V5, considerando la interacción Genotipo-Densidad-Fertilización.

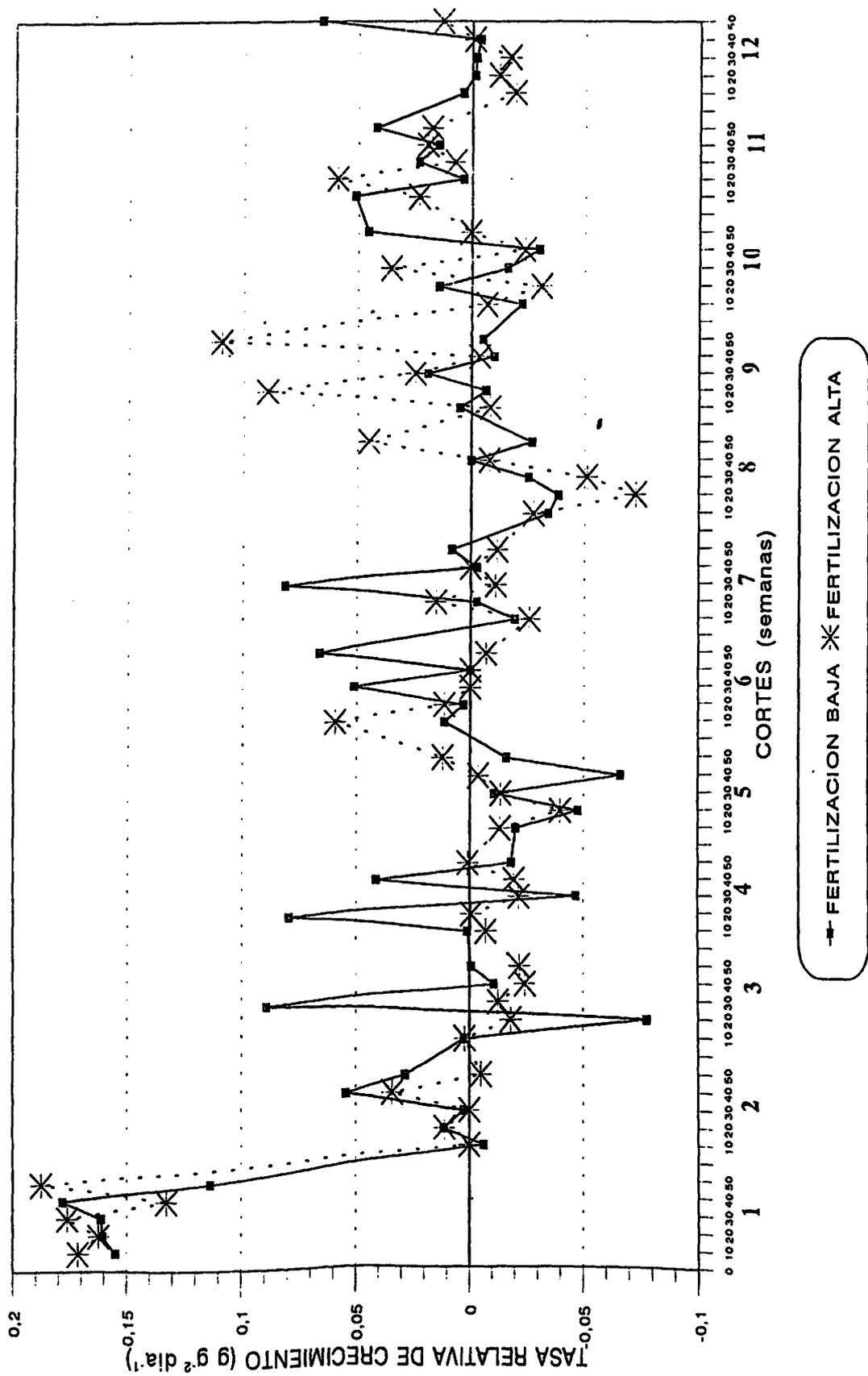


Figura 4.14. Tasa Relativa de Crecimiento para AN-TV6, considerando la interacción Genotipo-Densidad-Fertilización.

En la prueba de rango múltiple (Duncan 0.05) realizada para Índice de Area Foliar, con respecto al factor densidades, se encontró que la densidad de 50 plantas/m² fue superior al resto de las densidades (Cuadro 4.9). Para el factor genotipos, el AN-V3 fue superior para este parámetro, presentando comportamiento estadístico igual el genotipo AN-V5 (Cuadro 4.7). Para la interacción de los factores genotipos por densidades, 50 plantas/m² y genotipo AN-V3 fue superior al resto de las interacciones, presentando comportamiento estadístico igual la interacción de 50 plantas/m² y genotipo AN-V5 (Cuadro 4.7). Gráficamente observamos el comportamiento de este parámetro con respecto a los factores densidades, genotipos y la interacción respectiva en las Figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20.

Cuadro 4.9. Prueba de Rango Múltiple (Duncan 0.05) para IAF, considerando el factor densidades.

DENSIDAD (plantas/m ²)	INDICE DE AREA FOLIAR	
10	0.0840	e
20	0.1627	d
30	0.2576	c
40	0.3186	b
50	0.3880	a
VALOR DUNCAN	0.0385	

Valores con misma literal son estadísticamente iguales.

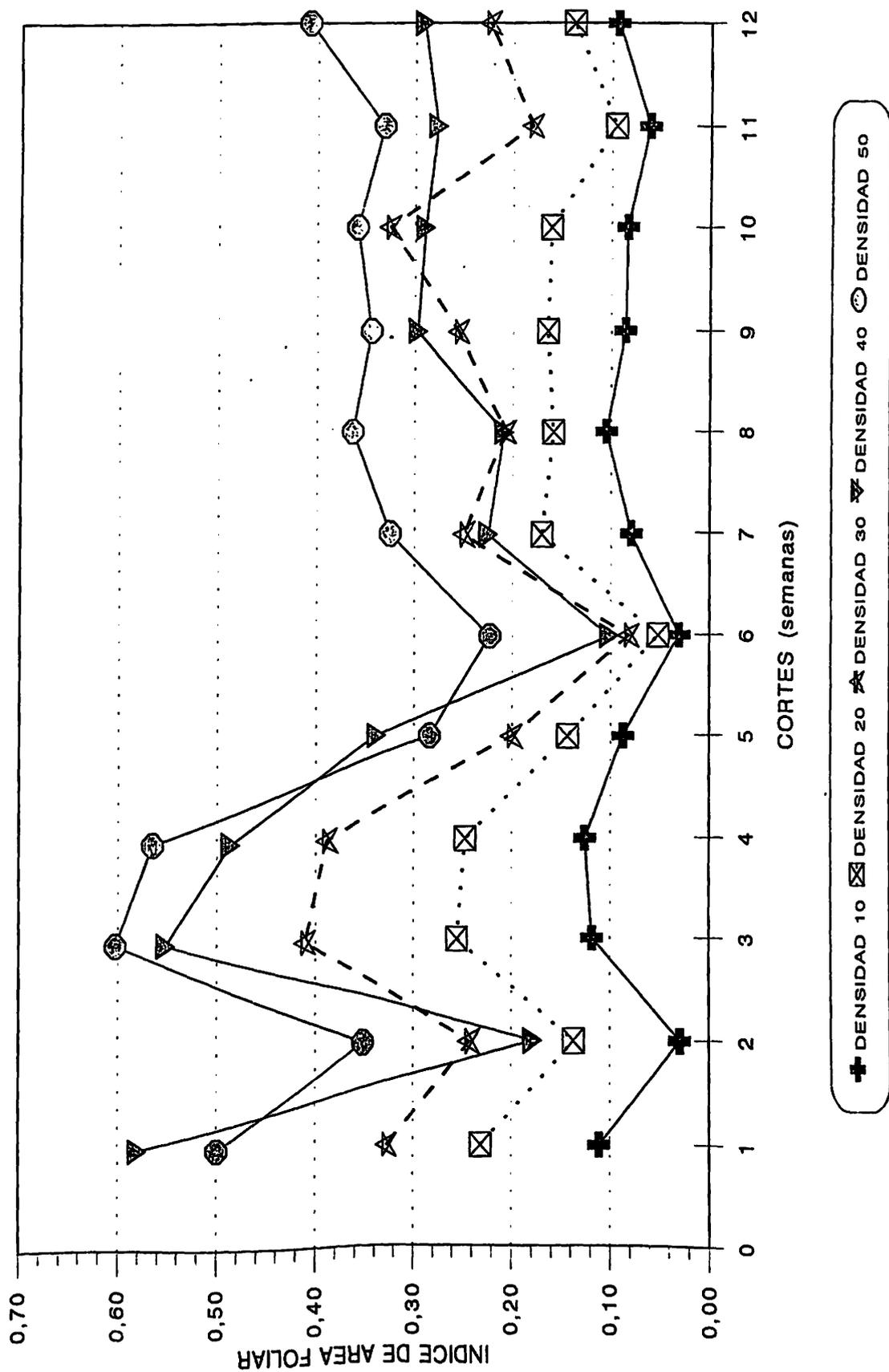


Figura 4.15. Indice de Area Foliar, considerando las Densidades en estudio.

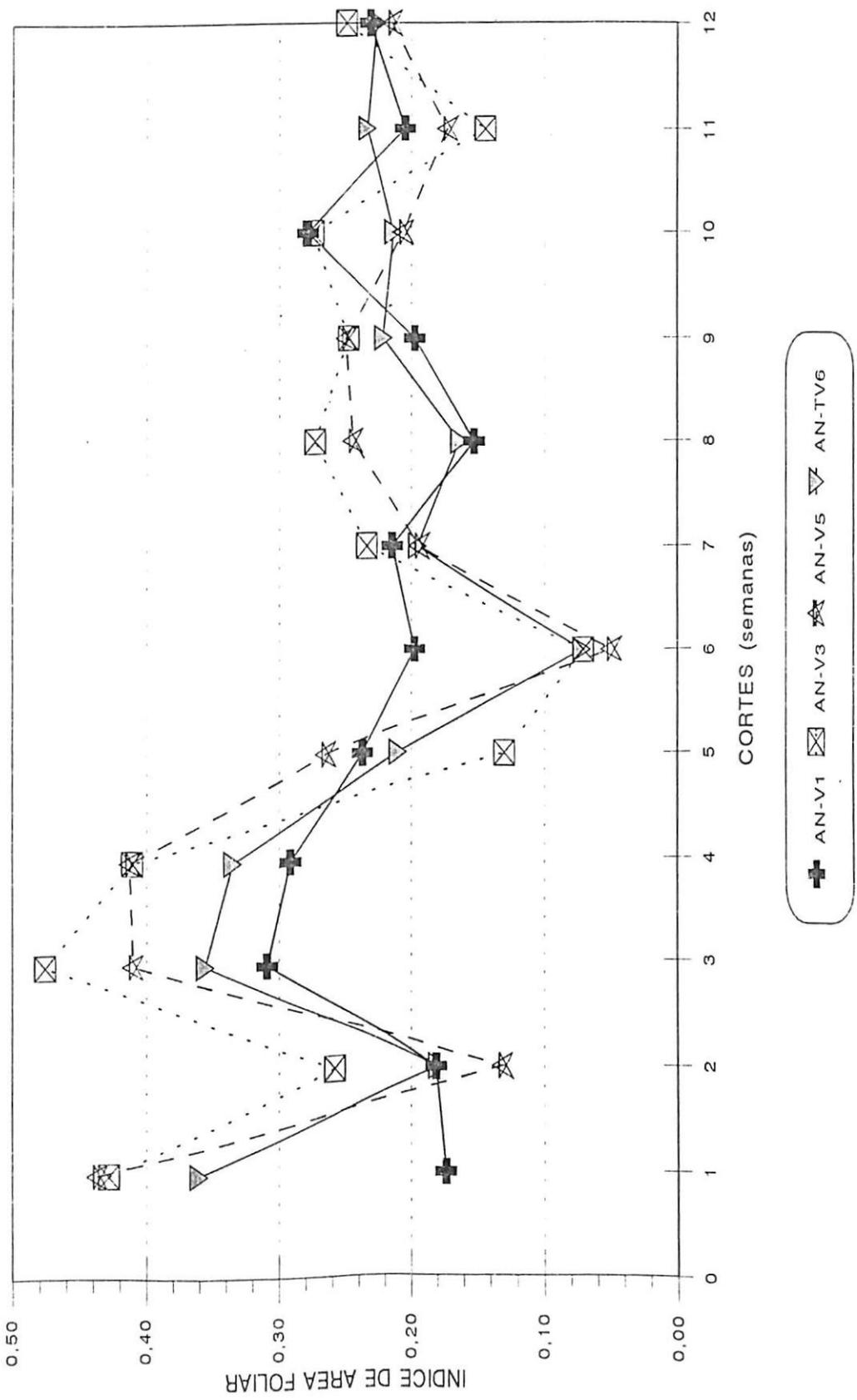


Figura 4.16. Indice de Area Foliar considerando los Genotipos en estudio.

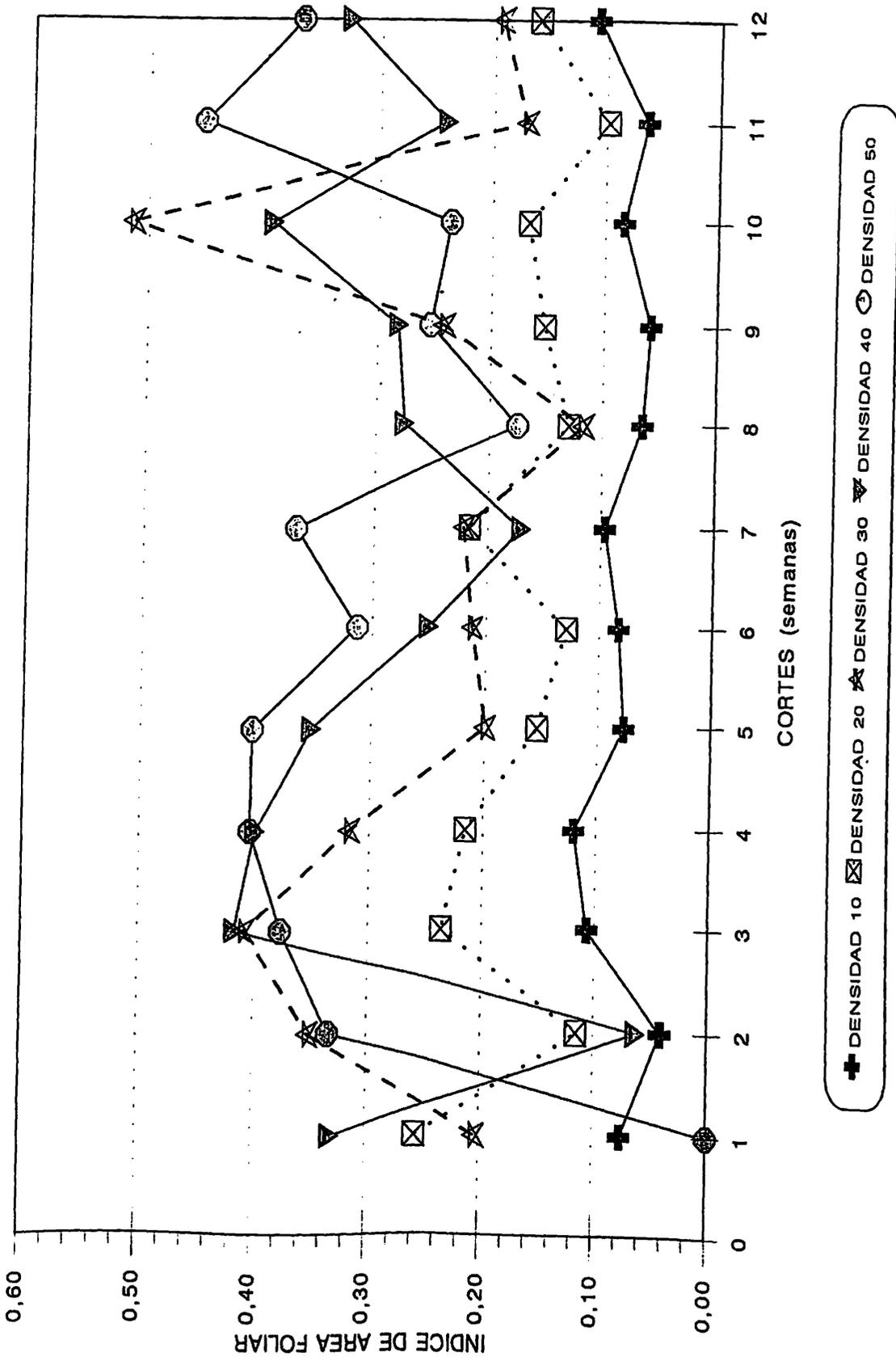


Figura 4.17. Índice de Area Foliar para AN-V1, considerando la interacción Genotipo-Densidad.

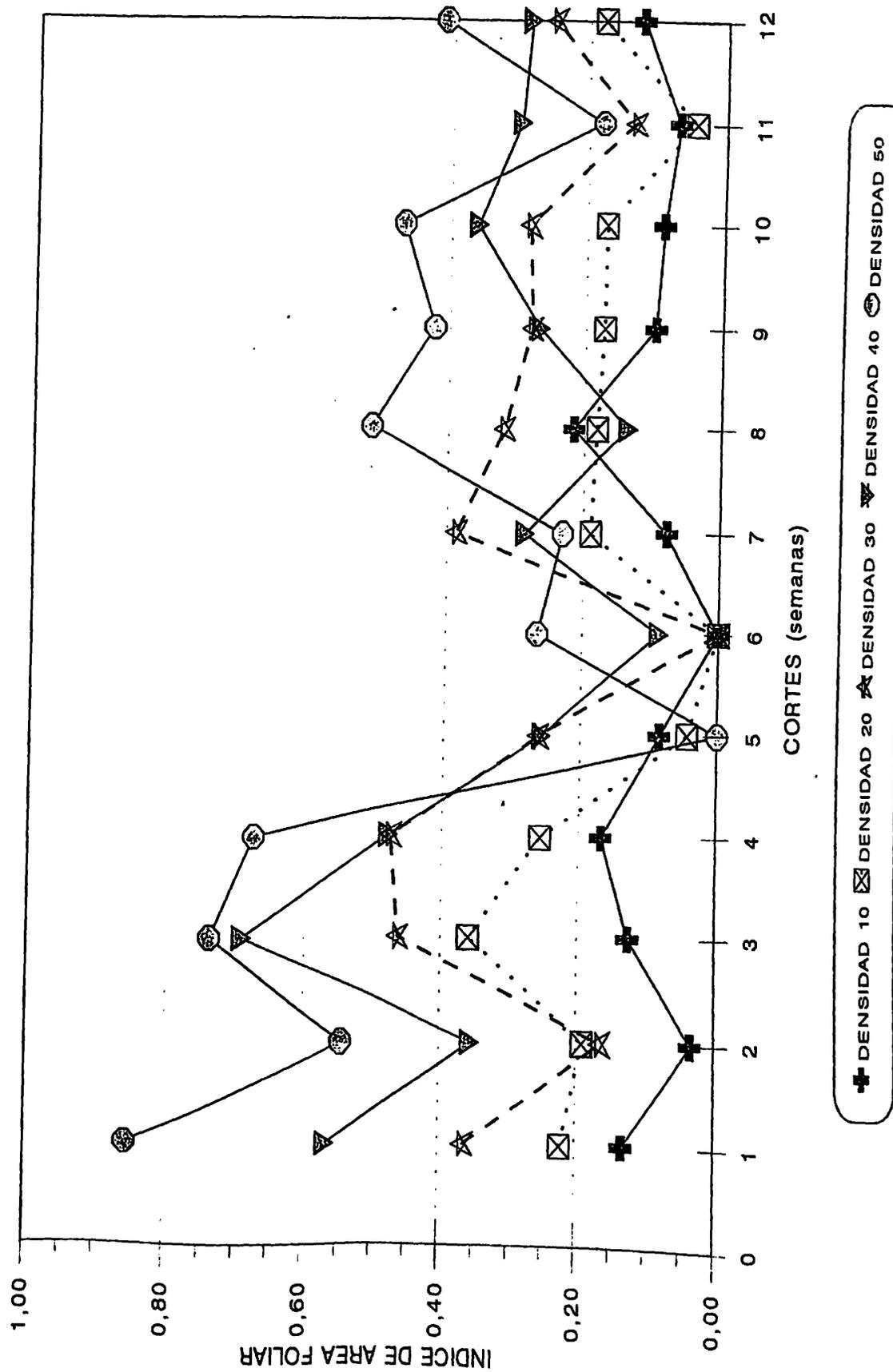


Figura 4.18. Indice de Area Foliar para AN-V3, considerando la interacción Genotipo-Densidad.

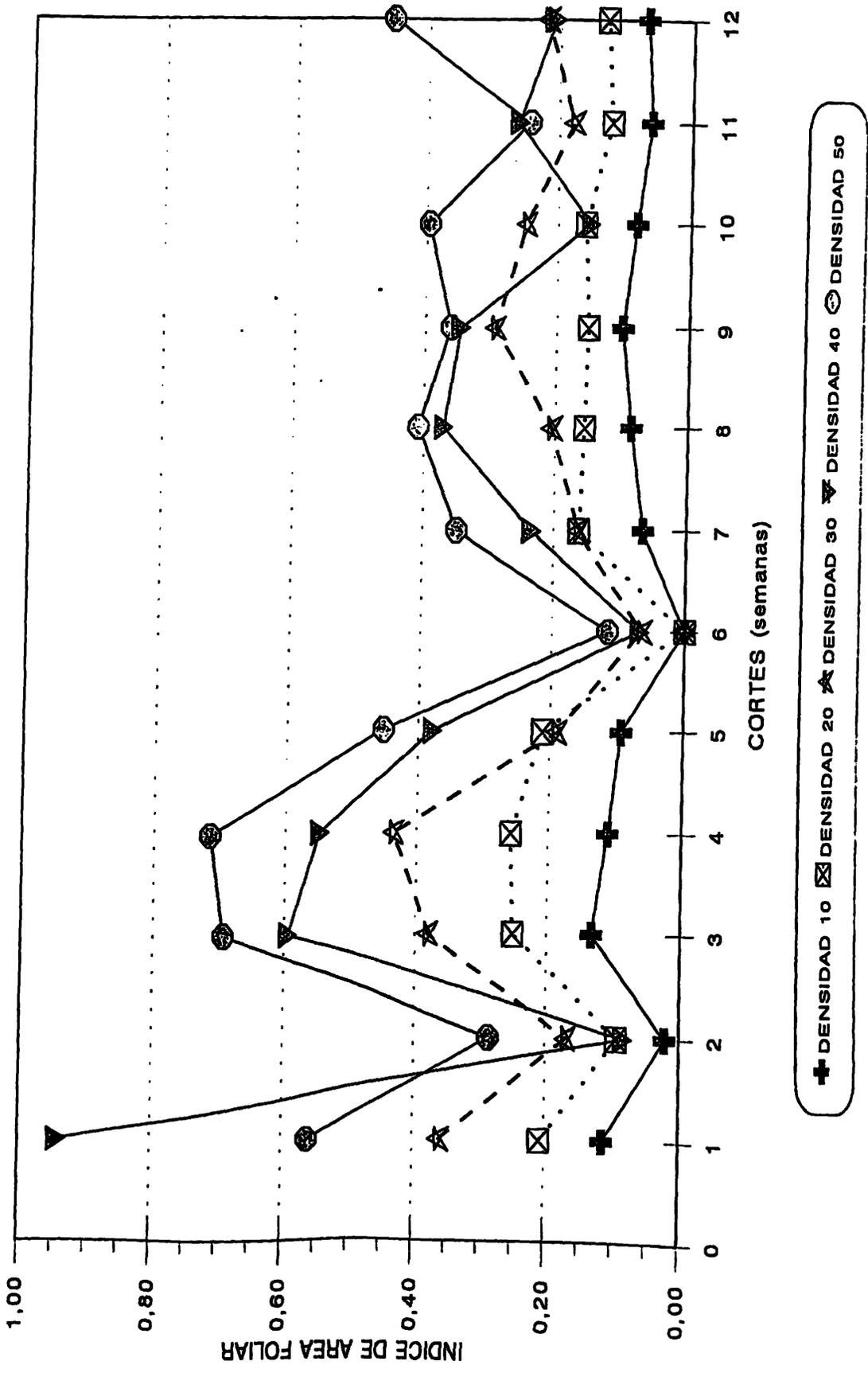


Figura 4.19. Indice de Area Foliar para AN-V5, considerando la interacción Genotipo-Densidad.

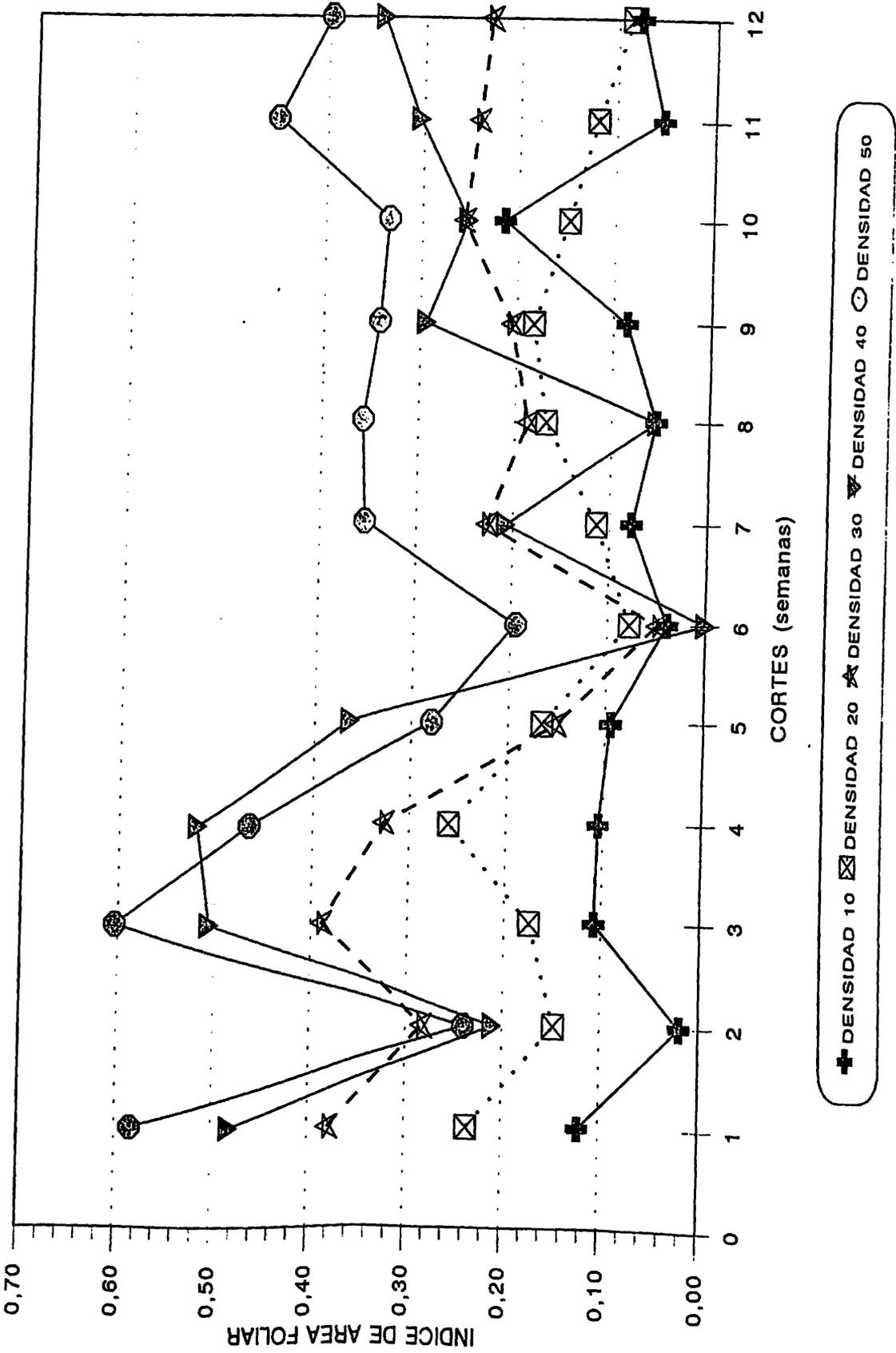


Figura 4.20. Índice de Area Foliar para AN-TV6, considerando la interacción Genotipo-Densidad.

Análisis de Correlación Fenotípica

Genotipo AN-V1

Los resultados completos de este análisis pueden observarse con detenimiento en el Cuadro 4.10, donde se muestra que la variable PS ni los parámetros ICC, TCC, TRC e IAF, se relacionan significativamente con la TAN desde el punto de vista estadístico, presentando solo correlaciones significativas (0.01) de ICC con TCC y TRC, con 0.6334 y 0.4873, respectivamente. Estas últimas, también presentan una correlación significativa, con un valor de 0.4633.

Cuadro 4.10. Matriz de correlaciones fenotípicas para PS y parámetros fisiotécnicos (ICC, TCC, TRC e IAF) con la TAN, considerando valores del genotipo AN-V1.

	PS	ICC	TCC	TRC	IAF	TAN
PS	1	-0.2648 NS	0.2790 NS	0.0660 NS	0.1189 NS	0.2586 NS
ICC		1	0.6334 **	0.4873 **	0.0170 NS	0.1016 NS
TCC			1	0.4633 **	0.1994 NS	0.3001 NS
TRC				1	0.3082 NS	0.0658 NS
IAF					1	0.0755 NS
TAN						1

PS= Peso Seco

ICC= Índice de Crecimiento del Cultivo

TCC= Tasa de Crecimiento del Cultivo

TRC= Tasa Relativa de Crecimiento

IAF= Índice de Área Foliar

TAN= Tasa de Asimilación Neta

** Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

NS= No Significativo estadísticamente

Valor de significancia= 0.463, con 28 grados de libertad

Genotipo AN-V3

Los resultados indican que solamente los parámetros ICC y TRC

presentaron una correlación significativa con la TAN con 0.5165 y 0.3760, respectivamente. Otros parámetros correlacionados significativamente fueron ICC con TCC y TRC, con 0.4816 y 0.6803, respectivamente. Además TCC y TRC se correlacionaron significativamente (0.01), con valor de 0.6162. Los resultados detallados se muestran en el Cuadro 4.11.

Cuadro 4.11. Matriz de correlaciones fenotípicas para PS y parámetros fisiotécnicos (ICC, TCC, TRC e IAF) con la TAN, considerando valores del genotipo AN-V3.

	PS	ICC	TCC	TRC	IAF	TAN
PS	1	-0.0948 NS	0.3204 NS	0.3356 NS	0.1560 NS	-0.1514 NS
ICC		1	0.4816 **	0.6803 **	0.1861 NS	0.5165 **
TCC			1	0.6162 **	0.0262 NS	0.0027 NS
TRC				1	0.3006 NS	0.3760 *
IAF					1	-0.0374 NS
TAN						1

PS= Peso Seco

ICC= Índice de Crecimiento del Cultivo

TCC= Tasa de Crecimiento del Cultivo

TRC= Tasa Relativa de Crecimiento

IAF= Índice de Área Foliar

TAN= Tasa de Asimilación Neta

* Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad

** Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

NS= No Significativo estadísticamente

Valores de significancia= 0.361 y 0.463 para 0.05 y 0.01, respectivamente con 28 grados de libertad.

Genotipo AN-V5

Los resultados muestran que solo peso seco está correlacionado de manera significativa con la TAN, con 0.3978, además este mismo, está relacionado de manera significativa con los parámetros TCC, TRC e IAF, con 0.4018, 0.3972 y 0.4751, respectivamente. El parámetro ICC, presenta una correlación significativa con TCC y TRC, con 0.7230 y 0.6892, respectivamente. Así mismo, el parámetro

TCC presenta una correlación significativa con TRC (0.6327). En el Cuadro 4.12 se muestran a detalle estos resultados.

Cuadro 4.12. Matriz de correlaciones fenotípicas para PS y parámetros fisiotécnicos (ICC, TCC, TRC e IAF) con la TAN, considerando valores del genotipo AN-V5.

	PS	ICC	TCC	TRC	IAF	TAN
PS	1	0.0150 NS	0.4018 *	0.3972 *	0.4751 **	0.3987 *
ICC		1	0.7230 **	0.6892 **	0.1091 NS	0.3226 NS
TCC			1	0.6327 **	0.2856 NS	0.3210 NS
TRC				1	0.2319 NS	0.2397 NS
IAF					1	0.1804 NS
TAN						1

PS= Peso Seco

ICC= Índice de Crecimiento del Cultivo

TCC= Tasa de Crecimiento del Cultivo

TRC= Tasa Relativa de Crecimiento

IAF= Índice de Área Foliar

TAN= Tasa de Asimilación Neta

* Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad

** Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

NS= No Significativo estadísticamente

Valores de significancia= 0.361 y 0.463 para 0.05 y 0.01, respectivamente, con 28 grados de libertad.

Genotipo AN-TV6

En este análisis, se encontró que los parámetros TCC e IAF, presentan una correlación significativa desde el punto de vista estadístico con la TAN, con 0.3761 y 0.4037, respectivamente; mientras que peso seco presentó una correlación significativa pero negativa con ICC (-0.3966), el parámetro ICC presentó una correlación altamente significativa con TCC y TRC con 0.8623 y 0.5020, respectivamente. Así mismo, TCC con TRC, con 0.4403 y finalmente TRC con IAF (0.5135). La información completa se muestra en el Cuadro 4.13.

Cuadro 4.13. Matriz de correlaciones fenotípicas para PS y parámetros fisiotécnicos (ICC, TCC, TRC e IAF) con la TAN, considerando valores del genotipo AN-TV6.

	PS	ICC	TCC	TRC	IAF	TAN
PS	1	-0.3966 *	-0.2173 NS	0.2575 NS	0.2916 NS	0.2133 NS
ICC		1	0.8623 **	0.5020 **	0.1795 NS	0.1561 NS
TCC			1	0.4403 **	0.3342 NS	0.3761 *
TRC				1	0.5135 **	0.0821 NS
IAF					1	0.4037 *
TAN						1

PS= Peso Seco

ICC= Índice de Crecimiento del Cultivo

TCC= Tasa de Crecimiento del Cultivo

TRC= Tasa Relativa de Crecimiento

IAF= Índice de Area Foliar

TAN= Tasa de Asimilación Neta

* Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad

** Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

NS= No Significativo estadísticamente

Valores de significancia= 0.361 y 0.463 para 0.01 y 0.01, respectivamente con 28 grados de libertad.

Análisis de Coeficientes de Sendero

Genotipo AN-V1

En el Cuadro 4.14 se muestra el análisis de coeficientes de sendero donde se consideró a Peso Seco (PS), Índice de Crecimiento del Cultivo (ICC), Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC), Tasa Relativa de Crecimiento (TRC) e Índice de Area Foliar (IAF) como aquellas variables que concurren de manera directa hacia la Tasa de Asimilación Neta (TAN), siendo los efectos directos los que se sitúan sobre la diagonal (subrayados) y fuera de esta las vías o efectos indirectos. Puede observarse que hay un efecto directo grande de PS sobre la TAN (0.1970) y un efecto mayor de la TCC con un valor de 0.2620 sobre la TAN. Por otro lado, el ICC afectó a la TAN de manera indirecta por su efecto a través de la TCC con

valor de 0.1659 ya que si observamos en el Cuadro 4.10 estos dos parámetros presentan un coeficiente de correlación significativo con un valor de 0.6334. Por su lado, la TRC presentó un efecto directo bajo y negativo (-0.0932) hacia la TAN, pero si afectó a la TAN principalmente en forma indirecta por su efecto a través de la TCC (0.1214), si observamos en el Cuadro 4.10 estos dos parámetros presentan un coeficiente de correlación significativo, con un valor de 0.4633. Por otra parte, el IAF presentó un efecto directo comparativamente pequeño (0.0280) hacia la TAN.

Cuadro 4.14. Coeficientes de Sendero de los efectos directos e indirectos para las variables PS, ICC, TCC, TRC e IAF con la TAN, considerando los valores del genotipo AN-V1.

	PS	ICC	TCC	TRC	IAF	TAN (correlación)
PS	<u>0.1970</u>	-0.0087	0.0731	-0.0061	0.0033	0.2586 NS
ICC	-0.0522	<u>0.0328</u>	0.1659	-0.0454	0.0005	0.1016 NS
TCC	0.0550	0.0208	<u>0.2620</u>	-0.0432	0.0056	0.3001 NS
TRC	0.0130	0.0160	0.1214	<u>-0.0932</u>	0.0086	0.0658 NS
IAF	0.0234	0.0006	0.0522	-0.0287	<u>0.0280</u>	0.0755 NS

Residual= 0.9333

NS= No Significativo estadísticamente

Genotipo AN-V3

En el Cuadro 4.15 se observan los coeficientes de sendero o efectos directos (subrayados) e indirectos. Se aprecia que este genotipo presentó diferencias muy marcadas con respecto al genotipo AN-V1 para estos efectos, de tal manera que el PS presenta un efecto comparativamente pequeño y además

negativo con valor de -0.0572 hacia la TAN. Por otro lado, el ICC afectó a la TAN directamente con un valor de 0.4973 , pero también tuvo un efecto indirecto a través de la TRC con valor de 0.2829 , ya que estos dos parámetros presentaron un coeficiente de correlación altamente significativo con un valor de 0.6803 (Cuadro 4.11), además presentó otro efecto indirecto y negativo a través de la TCC (-0.2257), debido a la correlación altamente significativa entre estos dos parámetros con un valor de 0.4816 (Cuadro 4.11). Con respecto a TCC, esta presentó un efecto directo negativo (-0.4687) hacia la TAN, pero también presentó un efecto indirecto a través de ICC (0.2395) y TRC (0.2563) ya que TCC está altamente correlacionada con ICC (0.4816) y con TRC (0.6162), estos valores se presentan en el Cuadro 4.11. Por su lado, TRC presentó un efecto directo de 0.4159 hacia la TAN, presentando también efectos indirectos debido principalmente a ICC (0.3383) y un efecto indirecto negativo a través de TCC (-0.2888), ya que si observamos en el Cuadro 4.11, TRC está altamente correlacionada con ICC (0.6803) y TCC (0.6162), como se mencionó anteriormente. Por otra parte, IAF presentó un efecto directo negativo hacia la TAN con un valor de -0.2338 , no presentándose efectos indirectos a través de otro parámetro, ya que el análisis de correlación fenotípica del mismo no fue significativa con el resto de los parámetros.

Cuadro 4.15. Coeficientes de Sendero de los efectos directos e indirectos para las variables PS, ICC, TCC, TRC e IAF con la TAN, considerando los valores del genotipo AN-V3.

	PS	ICC	TCC	TRC	IAF	TAN (correlación)
PS	<u>-0.0572</u>	-0.0471	-0.1502	0.1396	-0.0365	-0.1514 NS
ICC	0.0054	<u>0.4973</u>	-0.2257	0.2829	-0.0435	0.5165 **
TCC	-0.0183	0.2395	<u>-0.4687</u>	0.2563	-0.0061	0.0027 NS
TRC	-0.0192	0.3383	-0.2888	<u>0.4152</u>	-0.0703	0.3760 *
IAF	-0.0089	0.0926	-0.0123	0.1250	<u>-0.2338</u>	-0.0374 NS

Residual= 0.7554

* Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad

** Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

NS= No Significativo estadísticamente

Genotipo AN-V5

En el Cuadro 4.16 se presentan los efectos directos (subrayados) e indirectos de los parámetros en estudio hacia la TAN para este genotipo. Así tenemos que PS tuvo un efecto directo hacia la TAN con un valor de 0.6534, pero además efectos indirectos negativos a través de TCC (-0.0883), TRC (-0.1485) e IAF (-0.0289), ya que estos parámetros presentaron una correlación significativa con PS, con valores de 0.4018, 0.3972 y 0.4751, respectivamente (Cuadro 4.12). Por su lado, ICC, presentó un efecto directo hacia la TAN con valor de 0.7360, sin embargo, se toman en cuenta los efectos indirectos negativos a través de TCC (-0.1588) y TRC (-0.2577) ya que presentaron coeficientes de correlación significativos con 0.7230 y 0.6892, respectivamente (Cuadro 4.12). Por su parte, TCC presentó un efecto directo negativo con valor de -0.2197 hacia la TAN, pero también presenta efectos indirectos a través de PS con valor de 0.2625, ICC con

valor de 0.5321 y TRC con valor de -0.2366, debido a su alta correlación con estos parámetros, con valores de 0.4018, 0.7230 y 0.6327, respectivamente (Cuadro 4.12). Por otra parte TRC presentó un efecto directo negativo hacia la TAN con valor de -0.3740, pero además tuvo efectos indirectos a través de PS (0.2595), ICC (0.5072) y TCC (-0.1390), ya que presentaron coeficientes de correlación significativos con este parámetro, con 0.3972, 0.6892 y 0.6327, respectivamente (Cuadro 4.12). El parámetro IAF, tuvo un efecto comparativamente bajo y además negativo (-0.0609) pero este efecto fue debido principalmente al efecto indirecto a través de PS con valor de 0.3104, ya que estos dos caracteres presentaron una correlación altamente significativa con valor de 0.4751 (Cuadro 4.12).

Cuadro 4.16. Coeficientes de Sendero de los efectos directos e indirectos para las variables PS, ICC, TCC, TRC e IAF con la TAN, considerando los valores del genotipo AN-V5.

	PS	ICC	TCC	TRC	IAF	TAN (correlación)
PS	<u>0.6534</u>	0.0110	-0.0883	-0.1485	-0.0289	0.3987 *
ICC	0.0098	<u>0.7360</u>	-0.1588	-0.2577	-0.0066	0.3226 NS
TCC	0.2625	0.5321	<u>-0.2197</u>	-0.2366	-0.0174	0.3210 NS
TRC	0.2595	0.5072	-0.1390	<u>-0.3740</u>	-0.0141	0.2397 NS
IAF	0.3104	0.0803	-0.0627	-0.0867	<u>-0.0609</u>	0.1804 NS

Residual= 0.8205

* Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad
NS= No Significativo estadísticamente

Genotipo AN-TV6

En el Cuadro 4.17, se presentan efectos directos (subrayados) y efectos indirectos de los caracteres en estudio. Así, tenemos que PS presentó un efecto

directo hacia la TAN con un valor de 0.3002, aunque en forma indirecta tuvo un efecto bajo a través de ICC con valor de 0.0369, debido a la correlación significativa de estos dos caracteres, con valor de -0.3966 (Cuadro 4.13). Por otro lado, ICC tuvo un efecto directo negativo y comparativamente bajo, con valor de -0.0931, pero afectó a la TAN principalmente en forma indirecta por su efecto a través de TCC (0.4953) y TRC (-0.1866), debido a la correlación significativa entre estos parámetros con ICC, presentando valores de 0.8623 y 0.5020, respectivamente (Cuadro 4.13). El parámetro TCC tuvo un efecto directo grande con valor de 0.5744, pero además se considera que tuvo un efecto indirecto a través de TRC (-0.1637) por la correlación que presentaron estos dos parámetros considerada como significativa con valor de 0.4403 (Cuadro 4.13). Por su lado TRC tuvo un efecto directo negativo (-0.3717) hacia la TAN, pero debido a la correlación significativa con TCC e IAF, con valores de 0.4403 y 0.5135, respectivamente (Cuadro 4.13) tuvo un efecto indirecto principalmente a través de estos dos parámetros con valores de 0.2529 y 0.1704, respectivamente. Finalmente, IAF tuvo un efecto directo hacia la TAN con un valor de 0.3318, además un efecto indirecto negativo, principalmente a través de TRC con valor de -0.1909, debido a la correlación significativa entre estos dos parámetros con valor de 0.5135 (Cuadro 4.13).

Cuadro 4.17. Coeficientes de Sendero de los efectos directos e indirectos para las variables PS, ICC, TCC, TRC e IAF con la TAN, considerando los valores del genotipo AN-TV6.

	PS	ICC	TCC	TRC	IAF	TAN (correlación)
PS	<u>0.3002</u>	0.0369	-0.1248	-0.0957	0.0968	0.2133 NS
ICC	-0.1190	<u>-0.0931</u>	0.4953	-0.1866	0.0596	0.1561 NS
TCC	-0.0652	-0.0803	<u>0.5744</u>	-0.1637	0.1109	0.3761 *
TRC	0.0773	-0.0467	0.2529	<u>-0.3717</u>	0.1704	0.0821 NS
IAF	0.0875	-0.0167	0.1920	-0.1909	<u>0.3318</u>	0.4037 *

Residual= 0.7944

* Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad

NS= No Significativo estadísticamente

Análisis Organoléptico

En el análisis organoléptico realizado para los genotipos AN-V3 y AN-TV6, se determinó que las características color, tamaño y espinas de la penca, se calificaron como muy buenas para ambos genotipos, mientras que la forma y firmeza de la penca, el AN-V3 se calificó como excelente y muy buena, respectivamente, el genotipo AN-TV6 obtuvo calificación buena para ambas características. En lo que respecta a los platillos preparados, las características de consistencia, sabor y viscosidad, ambos genotipos no presentan diferencias en su calificación no siendo así las características de apariencia, acidez, color y olor donde si se presentaron diferencias. En el Cuadro 4.18, se muestran con mayor detalle los resultados obtenidos. En lo referente al pH para los cuatro genotipos, estos presentan los valores de 4.13, 4.05, 4.11 y 4.14, para los genotipos AN-V1, AN-V3, AN-V5 y AN-TV6, respectivamente (Cuadro 4.19).

Cuadro 4.18. Análisis organoléptico de dos genotipos de nopal (AN-V3 y AN-TV6) promedio de 60 degustaciones, considerando apariencia de la penca y diferentes platillos.

APARIENCIA DE LA PENCA							
GENOTIPO	COLOR	TAMAÑO	ESPINAS	FORMA	FIRMEZA		
AN-V3	MUY BUENO	MUY BUENO	BUENO	EXCELENTE	MUY BUENA		
AN-TV6	MUY BUENO	MUY BUENO	BUENO	BUENA	BUENA		
PLATILLOS PREPARADOS							
GENOTIPO	APARIENCIA	CONSISTENCIA	SABOR	ACIDEZ	VISCOSIDAD	COLOR	OLOR
AN-V3	EXCELENTE	MUY BUENA	EXCELENTE	MUY BUENA	MUY BUENA	EXCELENTE	EXCELENTE
AN-TV6	MUY BUENA	MUY BUENA	EXCELENTE	BUENA	MUY BUENA	MUY BUENO	MUY BUENO

Cuadro 4.19. Promedios de pH para genotipos en estudio, considerando los factores fertilizaciones y densidades.

GENOTIPO	VALORES DE pH
AN-V1	4.13
AN-V3	4.05
AN-V5	4.11
AN-TV6	4.14

DISCUSION

Producción de Brote, Peso Seco de Brote y Número de Brotes

Como lo señalan Tobár (1995) y Flores (1992), los genotipos presentaron diferencias muy marcadas para las variables producción de brote, peso seco de brotes y número de brotes (ambas estrechamente correlacionadas), debido a la amplia diversidad genética y geográfica de dichos genotipos, así como también las diferencias en sus características morfológicas, fisiológicas y genéticas, mismos que expresaron su potencial genético para dichas variables medidas. Tomando en consideración las condiciones ambientales y agronómicas en que fueron evaluados, se asevera que estos materiales se presentan como promisorios tanto para producción de manera intensiva como para futuros programas de mejoramiento, por sus características apropiadas para consumo en fresco como verdura y como para consumo de animales, empleándose como forraje. Así, tenemos que el genotipo AN-TV6 fue el más sobresaliente para las tres variables medidas, presentando comportamiento estadísticamente igual el genotipo AN-V1 solo para la variable número de brotes, el primero de ellos con características

de doble propósito, es decir, usado tanto para verdura como para fruto (tuna) y el segundo usado solo para verdura.

Con respecto al factor densidades, el cual presentó diferencias significativas para estas variables, se observa como la densidad de plantación influye de manera notable en la producción de brotes, peso seco de brotes y número de brotes, por estar estrechamente relacionadas, esto viene a corroborar lo mencionado por Flores (1992), Grajeda (1978), Bucio (1963), Barrientos y Flores (1969) y Tobar (1995), los cuales indican que a mayores densidades de plantación, se obtienen elevadas producciones de brotes y por lo consiguiente de peso seco y número de brotes, al considerar que en este caso la densidad que generó mayor producción de brotes, peso seco y número de brotes fue la de 20 plantas/m², además de las densidades de 10 y 30 plantas/m², mismas que presentaron un comportamiento estadístico igual a la de 20 plantas/m², es necesario considerar otras características que se han detectado, como la disminución del tamaño y el peso del brote, proteína (Flores, 1992) y elevación del contenido de fibra (Tobar, 1995) al aumentar la densidad de plantación; además, será necesario considerar el genotipo a establecer, aunque en este caso en particular no se detectaron diferencias significativas para la interacción densidad por genotipo; Tobar (1995) nos señala que si tomamos en cuenta estos dos factores, de acuerdo con su investigación, marca que un determinado genotipo y densidad de plantación alta, genera un resultado diferente a otro genotipo y

densidad de plantación diferente, en cuanto a número de brotes, calidad proteica del brote y contenido de fibra del brote.

Es necesario destacar que para ninguna de las tres variables anteriormente mencionadas, se detectaron diferencias para el factor fertilizaciones, mismo que se entiende no fue significativo para que se presentaran las diferencias respectivas; esto se debió principalmente a que en esta segunda evaluación, no se fertilizó de nuevo, sino que se consideró la fertilización realizada un año antes por Tobar (1995) quien señala que el peso de brotes se incrementó significativamente en los cortes 10 y 15 en el nivel de fertilización alta, mientras que en el corte 14, el número de brotes presentó un comportamiento superior en el nivel de fertilización normal. También reporta significancia para producción de brotes en los cortes 9 y 14 considerando la interacción de los factores fertilizaciones y densidades. Se asumió que sí tendría un efecto el abono orgánico a través del tiempo, considerando estas variables de carácter productivo y eficiencia de vital importancia para el productor e investigador. Así mismo, este factor no presentó diferencias con respecto a interacciones con el resto de los factores (genotipos y densidades).

Parámetros Fisiotécnicos

Tasa de Asimilación Neta

La eficiencia fotosintética de las plantas se expresa en términos de la tasa de asimilación neta, que es la cantidad de materia seca producida por unidad de hoja por unidad de tiempo, en este caso particular, como se mencionó en los resultados, para este parámetro solo se detectaron diferencias significativas para la interacción de los factores genotipo x densidad, presentándose como la mejor interacción la del genotipo AN-V1 con 30 plantas/m² y agrupados estadísticamente igual el genotipo AN-TV6 con las densidades de 40 y 50 plantas/m²; de nuevo, para este parámetro se manifiesta el potencial genético de los genotipos AN-TV6 y AN-V1 con respecto a las densidades, al influir notoriamente en dicho parámetro, ya que a mayores densidades, mayor tasa de asimilación neta, lógicamente, ya que al existir una relación estrecha de la tasa de asimilación neta y el índice de área foliar (Grajeda, 1988), definido éste como el área foliar por área unitaria de terreno (Beadle, 1988), al tener un mayor índice de área foliar, el cual está afectado directamente por la densidad de plantación, y al aumentar ésta última, el índice de área foliar aumenta en una proporción directa y por lo tanto se manifestará un incremento en la tasa de asimilación neta, no se debe olvidar que el índice de área foliar tiene un óptimo, que éste ocurre cuando casi toda la luz disponible ha sido interceptada y la relación de fotosíntesis a

respiración es máxima (Verhagen *et al.*, 1963), sin embargo, se sabe que las plantas CAM, a la cual pertenece el nopal, absorben el CO_2 en la oscuridad pero frecuentemente no a la luz, por lo tanto al existir mayor cantidad de cladodios (densidades altas) existirá una mayor captación de CO_2 y por lo consiguiente la síntesis de ácido málico por carboxilación durante la noche y el rompimiento de dicho ácido durante el día con liberación de CO_2 para que se lleve a cabo la fotosíntesis; se debe considerar también que al aumentar las densidades de plantación y por lo consiguiente el índice de área foliar, el cual más allá del óptimo sombrea los cladodios de manera fuerte, de tal suerte que existe una reducción de la fotosíntesis con la consecuente caída de la tasa de asimilación neta (Verhagen *et al.*, 1963). Al relacionar este parámetro con respecto al Uso Eficiente del Agua (UEA), se menciona que el UEA en maíz, (Quiroga, 1992) como medida de la resistencia a sequía está determinado principalmente por la Tasa de Asimilación Neta, Tasa de Crecimiento del Cultivo, Relación de Área Foliar, Área Foliar Específica, Duración del Peso del Tallo y Eficiencia del Área Foliar; por lo que en Nopal, este parámetro (TAN) posiblemente tenga una gran influencia ya que se caracteriza como una especie de clima desértico con alta eficiencia en el uso del agua.

Índice de Crecimiento del Cultivo

El incremento de peso seco de planta por unidad de tiempo, es decir, el índice de crecimiento del cultivo, como se mencionó en los resultados, solo

presentó diferencias significativas para el factor fertilizaciones, detectándose como la mejor para este parámetro, el nivel denominado como fertilización alta, el resto de los factores e interacciones no tuvieron significancia para dicho parámetro, esto lleva a suponer que el efecto del fertilizante orgánico (estiércol bovino), tiene una gran influencia en la velocidad de crecimiento del cultivo del nopal bajo las condiciones en que fue evaluada esta comunidad o grupo de plantas, aunque con diferente información genética, sí se logró que respondieran de manera favorable a dicha fertilización, ya que como lo señalan Rzedowski (1981) y García y Grajeda (1991) el nopal responde muy bien a aplicaciones de estiércol y fertilizaciones nitrogenadas.

Tasa de Crecimiento del Cultivo

Tanto el índice de crecimiento del cultivo, tasa de crecimiento del cultivo y tasa relativa de crecimiento, manejan principalmente peso seco y tiempo en sus fórmulas teóricas, sin embargo, el índice de crecimiento, además de éstos dos expone en su fórmula, el área foliar, expresándose en $\text{g/cm}^2/\text{día}^{-1}$. Así tenemos que para tasa de crecimiento del cultivo, como se mencionó en los resultados, presentó diferencias significativas con respecto a los factores fertilización y genotipos, manifestando un mejor comportamiento en el nivel de fertilización alta, al igual que el ICC, debido a la respuesta positiva del cultivo del nopal a la aplicación de abono (estiércol), mas sin embargo, se muestra que entre genotipos

esta tasa de velocidad de crecimiento es diferente para cada uno de ellos, es decir, existió una respuesta general del efecto fertilización para dicho parámetro, también, de acuerdo con la información genética de los materiales utilizados, existió una respuesta favorable, de tal manera que algunos tuvieron una velocidad de crecimiento superior a los otros, presentando esta característica el genotipo AN-V3 y estadísticamente igual el genotipo AN-V5. Al igual que la TAN, con respecto al Uso Eficiente del Agua como medida de la resistencia a sequía en maíz, este parámetro tiene una gran influencia en dicha resistencia, (Quiroga, 1992).

Tasa Relativa de Crecimiento

El incremento de material presente en cualquier instante de tiempo, es decir, la tasa relativa de crecimiento, como se mencionó anteriormente, no requiere del conocimiento del sistema asimilatorio (área foliar), y para el caso en particular, este parámetro presentó diferencias significativas para la interacción de los factores genotipos, densidades y fertilizaciones, por ser un componente básico del análisis de crecimiento y una medida fundamental de la producción de materia seca, se observa al detectar el efecto de factores en la triple interacción, el comportamiento de estos genotipos al manifestar su información genética en las condiciones en que fueron evaluados y bajo los efectos de tratamientos en condiciones definidas de niveles de fertilización y niveles de densidades de

plantación, estos dos últimos factores, de acuerdo a los resultados que arroja la prueba de rango múltiple, se detectó que tanto a un nivel de fertilización baja como a uno de alta, se presentan altos valores de esta parámetro, es decir, se encuentran como mejores interacciones en un nivel y otras de igual comportamiento estadístico; además, al igual que este factor, el factor densidades, no es significativo ya que se presentan valores iguales, tanto en densidades bajas (10 plantas/m²) como en densidades consideradas como altas (40 y 50 plantas/m²), por lo que se asume que las diferencias que presentó este parámetro son afectadas indirectamente por los factores fertilizaciones y densidades y directamente por el factor genotipos.

Indice de Area Foliar

Considerando la productividad del cultivo del nopal y específicamente de los genotipos evaluados en la presente investigación, al expresar su comportamiento por unidad de área de terreno, es decir su índice de área foliar, existieron diferencias significativas para este parámetro en los factores densidades, genotipos y en la interacción de los dos, es por lo tanto, que al calcular este índice, conocemos la proporción de superficie foliar expuesta a la luz, en la cual podrá ocurrir la fotosíntesis, de tal manera que sería lógico pensar que a mayor cantidad de área foliar, se tendría una mayor eficiencia en la tasa de asimilación neta, pero como se mencionó en la discusión de este último

parámetro, el índice de área foliar tiene un óptimo, entonces para este caso, se encontró que este índice es mayor en el nivel de 50 plantas/m², mas sin embargo, éste no se refleja en la TAN, ya que en esta se presenta como mejor densidad la de 30 plantas/m², sin embargo, las densidades de 40 y 50 plantas/m² se agrupan estadísticamente como iguales a la densidad de 30 plantas/m². Al considerar los genotipos para el IAF, se tiene que el AN-V3 es el que presentó valores mayores con respecto a los demás genotipos, con agrupamiento estadístico similar el AN-V5, mismos que por sus características morfológicas de penca, tienden a presentar estos índices altos. Ahora, si se considera la interacción, vemos cómo la densidad de 50 plantas/m² y los genotipos AN-V3 y AN-V5 presentaron valores altos, por lo que se permite mencionar que existe un efecto de cada uno de estos factores por separado, pero además existe un efecto debido a la interacción de ambos, sin embargo, esto no se ve reflejado en la TAN, ya que el genotipo AN-V1, con una densidad de 30 plantas/m² fue el más sobresaliente para este último parámetro fisiotécnico. Por otro lado, al relacionar este parámetro con la identificación de materiales con algún grado de resistencia a sequía en maíz, se necesita buscar la conjunción de valores altos de rendimiento, con bajos Indices de Area Foliar (IAF) y Tasas de Asimilación Neta (TAN) altas; valores mayores para Indice de Cosecha y Eficiencia del Area Foliar y una Tasa de Crecimiento del Cultivo alta en la etapa vegetativa, mayor Duración del Area Foliar, entre otras; (Quiroga, 1992); además, altos valores de IAF generalmente ocasionan disminución en el número de granos por unidad de área foliar en maíz, (Tanaka y Yamaguchi, 1977)

estudiando producción de materia seca y componentes de rendimiento en dicho cultivo, traduciéndose esta disminución en la velocidad de producción de materia seca por unidad de área foliar, y como consecuencia una reducción en el rendimiento, de tal manera que si lo anteriormente expuesto, se relaciona con nopal, sucede lo mismo, ya que al aumentar densidades, aumenta el IAF, el cual más allá del óptimo sombrea los cladodios de manera fuerte, de tal suerte que existe una reducción de la fotosíntesis con la consecuente caída de la TAN, fenómeno ya mencionado con respecto a la TAN.

Análisis de Senderos

Debido a que existieron diferencias muy notorias en el comportamiento de los parámetros fisiotécnicos en cada uno de los genotipos, es necesario tomar en cuenta tres aspectos importantes que están relacionados con los residuales, estimación de área foliar y análisis de correlación fenotípica, para así tratar de explicar dicho comportamiento.

Al conocer que la técnica de análisis de senderos maneja una variable artificial, llamada residual o término residual, la cual agrupa a todos los tipos de efectos no lineales de las variables predictoras, así como a las variables predictoras relevantes no incluidas (o no controladas) por una razón u otra en el conjunto a analizar, es necesario destacar que en los análisis de senderos

individuales realizados para los parámetros fisiotécnicos en estudio en cada uno de los genotipos para la presente investigación, se encontraron valores altos de dicho término con valores de 0.9333, 0.7554, 0.8205 y 0.7944 para los genotipos AN-V1, AN-V3, AN-V5 y AN-TV6, respectivamente, indicándonos con esto que existen variables relevantes que tienen influencia sobre la variable dependiente (TAN) y que no fueron incluidas en el modelo hacia la misma, y que probablemente una de ellas sea la variable tiempo (días), sin descartar otros parámetros fisiotécnicos, los cuales nos hubiesen dado una estimación posiblemente más precisa de los efectos sobre la TAN, algunos como la Duración del Area Foliar (DAF) es importante, ya que permite mantener la tasa fotosintética por mayor tiempo; la Relación de Area Foliar (RAF); Eficiencia del Area Foliar (EAF), entre otros no menos importantes. En estos últimos es necesario recalcar que tendrán una aplicación marginal en nopal, pues a diferencia de otros cultivos anuales en los que la técnica de parámetros fisiotécnicos se ha desarrollado, la DAF es máxima y permanente y el EAF sería también máximo y unitario (toda el área foliar es rendimiento económico).

También debe considerarse, en términos generales, que las correlaciones fenotípicas obtenidas y además los efectos directos e indirectos de los parámetros hacia la TAN, difieren en cuanto a que fueron estimados en diferentes materiales genéticos y que algunos de éstos se estimaron a través de fórmulas que contemplan el aparato asimilatorio (área foliar) de la planta (penca o cladodio) y

como se explicó en la metodología, éste fue estimado a través de un modelo de regresión distinto para cada uno de los genotipos, debido a las diferencias morfológicas y de succulencia del área foliar que presentan los mismos.

Otra situación relevante al respecto es que además de los residuales altos, el comportamiento de los parámetros es muy diferente en cada uno de los genotipos, esto es debido a que el análisis de correlación efectuado para dichos parámetros en cada genotipo, fue una correlación fenotípica, la cual considera los efectos ambientales que indudablemente afectan a estos parámetros y al no ser eliminados dichos efectos, la respuesta genética de cada genotipo en cada parámetro se ve enmascarada por los efectos antes mencionados por lo que la tendencia es presentar grandes diferencias para cada parámetro y en cada uno de los análisis de correlación y de senderos individuales. Sin embargo, Willman *et al.*, (1987) mencionan que aunque las correlaciones simples no son indicativos de una causa y efecto, éstas son útiles en la determinación del grado y dirección de la asociación entre dos factores.

Peso Seco

Esta variable presentó efectos directos relativamente grandes hacia la TAN, a excepción en el genotipo AN-V3, el cual presentó un efecto pequeño y además negativo, esto posiblemente se debió a que la penca o cladodio de dicho

03986

genotipo no es muy suculenta y además presenta alto contenido de agua en sus tejidos. Esta variable, por ser aquella que se obtiene para ser utilizada en el cálculo de los principales parámetros fisiotécnicos, considerando a la TAN como el de mayor interés, es de destacarse que no haya presentado una correlación significativa con dicho parámetro en la mayoría de los análisis de correlación efectuados, exceptuando al genotipo AN-V5; atribuyéndole este resultado a lo discutido en párrafos anteriores. Sin embargo, los efectos directos de PS hacia la TAN, nos muestran que es uno de los indicadores principales, que permiten explicar la eficiencia fotosintética de los genotipos de nopal, expresada en términos de la TAN, y la explicación biológica se fundamenta en que un aparato asimilatorio de más cuerpo tiene mayor capacidad para producir fotosintatos y enviarlos al resto de la planta.

Indice de Crecimiento del Cultivo

El comportamiento de este parámetro a través de los análisis de senderos por genotipo presentó efectos directos positivos a excepción del genotipo AN-TV6, el cual mostró un efecto directo bajo y negativo, por lo que este parámetro, debido a que se manifiesta como un incremento de peso seco por unidad de tiempo incluyendo el tamaño del sistema asimilatorio de planta u órgano de la misma (penca o cladodio) es una buena característica que permite explicar la eficiencia fotosintética de la especie en estudio a través de la TAN.

Tasa de Crecimiento del Cultivo

En este parámetro se encontraron valores altos de efectos directos, aunque se presentaron dos negativos (AN-V3 y AN-V5), pero éstos presentan efectos indirectos a través de ICC y TRC, con correlación significativa entre ambos. Tanto el ICC, TCC y TRC, presentan una relación significativa en todos los análisis para los genotipos, por lo que se consideran características que al medirse como incremento de material por unidad de tiempo, permiten explicar la eficiencia fotosintética de los genotipos de la especie en estudio.

Tasa Relativa de Crecimiento

Como se mencionó anteriormente, este parámetro guarda una estrecha relación con ICC y TCC, y presenta efectos directos altos hacia la TAN, sólo en el AN-V3 son positivos, el resto de los efectos están influyendo indirectamente a través de ICC y TCC, por lo que también esta característica permite explicar la eficiencia fotosintética del nopal a través de los genotipos estudiados, que por la situación de tratarse de diferentes materiales genéticos ocasiona diferencias en su comportamiento a través de los mismos.

Indice de Area Foliar

Al igual que el resto de los parámetros, también IAF presenta diferencias a través de los genotipos, sin embargo, se observa que los efectos directos a pesar de no ser valores altos (AN-V1 y AN-V5) y ser negativos (AN-V3 y AN-TV6), se considera de manera general que es una característica que teóricamente guarda una relación estrecha con la TAN, por lo que su efecto a través de análisis de senderos nos dice que es una buena característica para determinar la eficiencia fotosintética de la especie en estudio.

CONCLUSIONES

- ◆ Las variables Producción, Peso Seco y Número de Brotes, sólo presentaron diferencias en los factores densidades y genotipos, resultando como la mejor densidad la de 20 plantas/m², con comportamiento estadístico igual, las densidades de 10 y 30 plantas/m²; los mejores genotipos para estas variables fueron el AN-TV6 y AN-V1.
- ◆ Considerando la interacción de genotipo por densidad, que fue donde la TAN presentó diferencias significativas, el genotipo AN-V1, con densidad de plantación de 30 plantas/m², es el que posee una mayor eficiencia fotosintética, presentando comportamiento estadístico igual el genotipo AN-TV6 con densidades de 40 y 50 plantas/m².
- ◆ Los mayores ICC y TCC, se presentaron en el nivel de fertilización alta.
- ◆ En la interacción de genotipo por densidad, los mejores IAF los presentaron los genotipos AN-V3 y AN-V5 con una densidad de plantación de 50 plantas/m².

- ◆ Los genotipos AN-V3 y AN-V5 presentaron mejores TCC que el resto de los genotipos, aunque no existieron diferencias muy marcadas.
- ◆ Los mejores IAF, considerando las densidades de plantación, se presentaron en la densidad de 50 plantas/m².
- ◆ Con respecto a la TRC, los genotipos AN-V1 y AN-V3, presentaron mejores respuestas que el resto de los genotipos, en la densidad de 40 plantas/m², no presentando influencia el factor fertilizaciones.
- ✓ ◆ En general, PS, ICC, TCC, TRC e IAF, presentaron correlaciones altas y positivas con la TAN en los análisis individuales por genotipo realizados.
- ✓ ◆ Tanto PS como ICC, TCC, TRC e IAF, son parámetros o características fisiológicas que permiten explicar la eficiencia fotosintética de genotipos de nopal a través de la TAN,.
- ◆ Se encontraron valores altos de residualidad por lo que es necesario considerar otros parámetros fisiotécnicos no considerados en el presente estudio.

RESUMEN

El presente estudio consistió en determinar algunos parámetros de eficiencia y productividad como: Índice de Crecimiento del Cultivo (ICC); Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC); Tasa Relativa de Crecimiento (TRC); Índice de Área Foliar (IAF) y Tasa de Asimilación Neta (TAN) en cuatro genotipos de nopal (AN-V1, AN-V3, AN-V5 y AN-TV6), bajo condiciones de producción intensiva de semi-forzado en túneles de polietileno, determinando producción, peso seco y número de brotes tiernos (nopalitos) como variables agronómicas principales, considerando los factores fertilizaciones y densidades con dos y cinco niveles, respectivamente. Además se trató de encontrar el sistema de producción más adecuado al considerar las mayores eficiencias y productividades de los genotipos bajo las condiciones en que fueron evaluados. Se realizaron correlaciones fenotípicas entre los parámetros y se determinó mediante la técnica de análisis de sendero, aquellos que mejor explican la eficiencia fotosintética de los genotipos estudiados.

Los resultados revelan que las variables producción, peso seco y número de

brotos, presentaron comportamiento superior en la densidad de 20 plantas/m² y estadísticamente en las densidades de 10 y 30 plantas/m², siendo los mejores genotipos para estas variables el AN-TV6 y AN-V1; además este último se presentó como el de mayor eficiencia fotosintética en la densidad de 30 plantas/m² y estadísticamente el AN-TV6 en las densidades de 40 y 50 plantas/m². Los mayores ICC y TCC se presentaron en el nivel de fertilización alta, mientras que AN-V3 y AN-V5, tuvieron mayores TCC. Los mejores IAF, los presentaron los genotipos AN-V3 y AN-v5, con 50 plantas/m². La interacción de los tres factores fue significativa solo para TRC, donde AN-V1 y AN-V3 con 40 plantas/m² con niveles de fertilización alta y baja, respectivamente, se presentaron como las mejores interacciones. En general, los parámetros considerados en el presente estudio presentaron correlaciones altas y positivas con la TAN y resultaron ser buenos indicadores que permiten explicar la eficiencia fotosintética de los genotipos a través de la misma.

LITERATURA CITADA

- Acevedo, E.; I. Badilla; and P.S. Nobel. 1983. Water Relations, Diurnal Acidity Changes, and Productivity of a Cultivated Cactus, *Opuntia ficus-indica* Plant Physiol. 72: 775-780.
- Barrientos, P.F. y Flores, C.V. 1969. Observaciones en un clon de nopal forrajero (*Opuntia ficus indica* Mill) variedad Copena F1. Colegio de Postgrado, Chapingo, México.
- Beadle, C.L. 1988. Análisis del Crecimiento Vegetal. En: Coombs, J. D.O. Hall, S.P. Long y J.M. Scurlock (Editores). Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México, México.
- Becerra, R.S.; Barrientos, P.F. y Díaz, M.D. 1976. Eficiencia Fotosintética del Nopal (*Opuntia* spp) en Relación con la Orientación de sus Cladodios. Agrociencia Número 23. Rama de Genética. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. p. 67-77.
- Beltrán, E. 1964. Las Zonas Áridas del Centro y Noreste de México y el Aprovechamiento de sus Recursos. Instituto Mexicano de Recursos Renovables, A.C. México. 182 p.
- Blackman, V.H. 1919. The compound interest law and plant growth. Ann. Bot. 33:353-360.
- Borrego, E. F. y Burgos, V.N. 1986. El Nopal. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 202 p.

- Bravo, H.H. 1978. Las cactáceas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Brinkman, M.A. and K.J. Frey. 1977. Growth analysis of isoline recurrent parent. Grain yield differences in oats. *Crop Sci.* 17:426-430.
- Bucio, A.L. 1963. El Mejoramiento del Nopal en México. Conferencia en la Soc. Mexicana de Historia Natural. México.
- Cienfuegos, I. F. 1986. Producción de Alimentos en Condiciones Naturales Adversas Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Forestales. Publicación Especial Número 118. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. p. 4-9.
- Fakorede, M.A. and J.J. Mock. 1980. Growth analysis of maize variety hybrids obtained from two recurrent selection programmes for grain yield. *New Phytol.* 85:393-408.
- Flores, V.G. 1992. Respuesta de Producción de Nopalitos y de pH de 4 Genotipos de Nopal (*Opuntia spp.*), Tolerantes a Heladas a 3 Densidades en Invierno. Tesis Ingeniero Agrónomo Fitotecnista. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 55 p.
- García, C.V. de.; Nobel, P.S. 1986. Modeling of PAR intercepting and Productivity of a Prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica* L. at Various Spacings. *Agronomy J.* 78 (1): 80-85.
-
1990. Worldwide Environmental Productivity Indices and Yield Predictions For a CAM Plant, *Opuntia ficus-indica*, Including Effects of Doubled CO₂ Levels. *Agricultural and Forest Meteorology.* 49 (4):261-279.
- García, V.A. y Grajeda, G.J.E. 1991. Cultive Nopal para Verdura. Segunda Reimpresión. Folleto de Divulgación.. Colegio de Postgraduados. Centro de Genética. Chapingo, México. 18 p.

- Grajeda, G.J.E. 1978. Influencia de la Poda sobre la Producción Intensiva de Nopal Verdura (*Opuntia spp.*) y su Relación con la tasa de asimilación neta. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 94 p.
- Hunt, R. 1981. Plant Growth Analysis. By Edward Arnold (Publishers) Limited. The Institute of Biology's. Studies in Biology No. 96. London, Great Britain. 67 p.
- López J., A. y P. Cruz H. 1988. Efecto de la fertilización con N, P y K y tres fuentes de materia orgánica en Nopal Tunero (*Opuntia amyoclaea* T.). En: López G., J.J. y M.J. Ayala O. (Ed.). El Nopal. Programa y Resúmenes de la tercera Reunión Nacional y primera Internacional. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, p. 58.
- Mejía L. F. 1988. Experiencias obtenidas sobre el cultivo del nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) bajo el sistema de microtúnel para producción en invierno. En: López G., J.J. y M.J. Ayala O. (Ed.). El Nopal. Programa y Resúmenes de la tercera Reunión Nacional y primera Internacional. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, p. 63.
- Méndez G., S. de J. y J. de J. Martínez H. 1988. Efecto de la fertilización química y orgánica sobre el rendimiento en tres formas de Nopal (*Opuntia spp*) en una plantación comercial. En: López G., J.J. y M.J. Ayala O. (Ed.). El Nopal. Programa y Resúmenes de la tercera Reunión Nacional y primera Internacional. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, p. 70.
- Nerd, A.; Karady, A.; Mizrahi, Y. 1991. Out-of-Season prickly pear: fruit characteristics and Effect of Fertilization and Short Droughts on Productivity. Hort Sci. 26 (5): 527-529.
- Nobel, P.S. 1988. Productivity of Desert Succulents. Arid Lands: Today and Tomorrow. Proceedings of the International Research and Development Conference, Tucson, Arizona, U.S.A. p. 137-148.

- _____ 1991. Environmental Productivity Indices and Productivity for *Opuntia ficus-indica* Under Current and Elevated Atmospheric CO₂ Levels. *Plant Cell Environment*. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 14 (7): 637-646.
- _____ García, V.C. de. 1991. Growth and Predicted Productivity of *Opuntia ficus-indica* for Current and Elevated Carbon Dioxide. *Agronomy Journal*. 83 (1): 224-230.
- _____ Hartsock, T.L. 1986. Environmental Influences on the Productivity of Three Desert Succulents in the South-Western United States. *Plant-Cell and Environment*. 9(9):741-749.
- Quiroga, O. 1992. Análisis de Senderos para Características Relacionadas con Resistencia a Sequía en 12 Genotipos de Maíz (*Zea mays* L.). Tesis de Maestría. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 173 p.
- Radford, P.J. 1967. Growth analysis Formulae-Their Use and Abuse. *Crop Sci.* 7 (3): 171-175.
- Rzedowski, J.R. 1981. Vegetación de México. LIMUSA. México.
- Tobar, R.R. 1995. Producción de Verdura (Rendimiento y Calidad) de 4 Genotipos de Nopal (*Opuntia spp*), Considerando 5 Densidades de Plantación, 2 Fertilizaciones Orgánicas y Túneles de Polietileno. Tesis Ingeniero Agrónomo en Horticultura. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 61p.
- Verhagen, A.M., Wilson, J.H. and Britten, E.J. 1963. Plant production in relation to foliage illumination. *Ann. Bot.* 27:627-640.
- Watson, D.J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of yield crops. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties and within and between years. *Ann. Bot.* 11:41-76.

- Watson, D.J. 1952. The physiological basis of variation in yield. *Adv. Agron.* 4:101-145.
- Watson, D.J. 1956. Leaf growth in relation to crop yield. In: *The growth of leaves. Proceedings of the third Easter School in Agricultural Science, University of Nottingham. Milthorpe, F.L. (Ed.). Butterworths Sci. Publ. London.*
- Watson, D.J. 1958. The dependence of net assimilation rate on leaf area index. *Ann. Bot.* 22:37-54.
- Willman, M.R.; F.E. Bellow; R.J. Lambert; A.E. Howey and D.W. Mies. 1987. Plant traits related to productivity of maize. I. Genetic variability, environmental variation, and correlation with grain and stalk lodging. *Crop Sci.* 27(6):1116-1121.