

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Uso de índices de Vegetación para Estimar Biomasa en Triticales Primaverales
e Invernales

Por:

ROBER ARBID GARCÍA MORALES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Uso de Índices de Vegetación para Estimar Biomasa en Triticales Primaverales
e Invernales

Por:

ROBER ARBID GARCÍA MORALES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Carlos Javier Lozano Cavazos
Asesor Principal



Dr. Antonio Flores Naveda
Coasesor



Dr. Enrique Navarro Guerrero
Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2018

DEDICATORIA

A DIOS

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. Por cada una de sus bendiciones que me ha dado durante mis estudios y fuera de ellos, además de haberme fortalecido en los momentos más difíciles y por cada uno de mis sueños que ha logrado cumplirme.

A MIS PADRES

Papá Bistraín García Pérez, te dedico este logro con todo mi corazón, me entristece y me llena de lágrimas que no puedas verme en vida, pero sé que desde el cielo puedes estar muy orgulloso de lo que ahora soy, porque desde que te fuiste nada ha sido fácil, dejaste un vacío imposible de llenar, fuiste un gran hombre al que tuve la suerte y fortuna de llamar Padre.

A mi madre Juana Moralez Moralez, por cada uno de sus consejos, por apoyarme en cada momento de mi vida, por cada uno de sus esfuerzos y por inculcarme los valores que ahora poseo, ya que fueron piedra angular para poder terminar con éxito mi carrera profesional.

Gracias por creer en mí y por ayudarme a nunca bajar los brazos cuando todo se complicaba.

A MIS HERMANAS

Que cada uno de ellas que puso su confianza en mí, para demostrarles que podemos salir adelante cuando nos lo proponemos, a cada uno de ellos por su motivación y estar presente en las buenas y en las malas conmigo.

Y no me queda más que decirle gracias a cada uno de los mencionados por todo lo que me han dado, espero ser justo y honesto con lo que me han dado.

AGRADECIMIENTOS

*A mi primo **Juiver Dorain Morales García** por haberme brindado su apoyo durante todo el camino que he recorrido para terminar mi carrera profesional.*

*A mi cuñado **Ángel Fernando Cardona Vígil**, por su confianza y apoyo depositado en mí.*

A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir buenos y malos momentos conmigo.

*A mi "**ALMA TERRA MATER**" por permitirme terminar mis estudios en esta gran casa de estudios que orgullosamente llevo recuerdos en mi corazón.*

Gracias por formarme profesionalmente durante estos 4 años y medio, por cobijarme entre tus aulas y llevarme esas enseñanzas que día a día me impartieron.

Al Dr. Alejandro Javier Lozano del Río, por ser la base fundamental en este trabajo, por todas sus enseñanzas, amistad y toda su confianza puesta en mí. En verdad muchas gracias, me llevo una gran experiencia y orgulloso de ser parte de su equipo de trabajo.

Al Dr. Carlos Javier Lozano Cavazos por su participación en este estudio, muchas gracias.

Al Dr. Enrique Navarro Guerrero y al Dr. Antonio Flores Naveda por su participación en este trabajo, de antemano muchas gracias.

A todos mis profesores que durante mis estudios me brindaron apoyo y compartieron sus conocimientos para mi desarrollo profesional.

INDICE DE CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Objetivos	2
Objetivos generales.....	2
3. Hipótesis.....	3
4. Revisión de literatura.....	4
Generalidades.....	4
Tipos de triticale.....	5
Efecto de la fertilización nitrogenada en los cultivos.....	6
NDVI.....	8
Área foliar.....	10
Acumulación de biomasa.....	11
Análisis de imágenes digitales.....	12
5. Materiales y métodos.....	14
Localización del sitio experimental.....	14
Desarrollo del experimento.....	14
Material genético utilizado.....	14
Preparación del terreno.....	15
Fecha de siembra.....	16
Tamaño de parcela experimental.....	16
Fertilización.....	16
Riegos.....	16
Control de plagas, enfermedades y malezas.....	17
Muestreos.....	17
Diseño experimental utilizado en campo.....	18
Variables registradas.....	18
Análisis estadísticos.....	20
Modelo estadístico de los análisis de varianza por muestreo para la variable en estudio	21
Pruebas de comparación de medias.....	21
6. Resultados.....	23

Altura.....	23
Etapas.....	25
Biomasa seca total.....	28
Área foliar.....	31
NDVI.....	34
GA.....	37
GGA.....	40
7. Discusión.....	43
8. Conclusiones.....	55
9. Literatura citada.....	56
10. Resumen.....	62

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No		Pág.
1	Lista de genotipos y sorteo utilizados en el Experimento. Navidad,N.L. Ciclo 2014 – 2015.....	15
2	Resultados de los análisis de varianza para altura por muestreo. Navidad 2015.....	23
3	Resultados de la prueba de comparación de medias de altura entre dosis de fertilización por muestreo. Navidad 2015.....	24
4	Resultados de la prueba de comparación de medias de altura entre grupos de triticales por muestreo. Navidad 2015.....	25
5	Resultados de los análisis de varianza para etapa por muestreo. Navidad 2015.....	26
6	Resultados de la prueba de comparación de medias de etapa entre dosis de fertilización por muestreo. Navidad 2015.....	27
7	Resultados de la prueba de comparación de medias de etapa entre grupos de triticales por muestreo. Navidad 2015.....	28
8	Resultados de los análisis de varianza para biomasa seca total por muestreo. Navidad 2015.....	29
9	Resultados de la prueba de comparación de medias de biomasa seca total entre dosis de fertilización por muestreo. Navidad 2015.....	30

10	Resultados de la prueba de comparación de medias de biomasa seca total entre grupos de triticales por muestreo. Navidad 2015..	31
11	Resultados de los análisis de varianza para área foliar por muestreo. Navidad 2015.....	32
12	Resultados de la prueba de comparación de medias para área foliar entre dosis de fertilización por muestreo. Navidad 2015.....	33
13	Resultados de la prueba de comparación de medias para área foliar entre grupos de triticales por muestreo. Navidad 2015.....	34
14	Resultados de los análisis de varianza para NDVI por muestreo. Navidad 2015.....	35
15	Resultados de la prueba de comparación de medias para NDVI entre dosis de fertilización por muestreo. Navidad 2015.....	36
16	Resultados de la prueba de comparación de medias para NDVI entre grupos de triticales por muestreo. Navidad 2015.....	37
17	Resultados de los análisis de varianza para GA por muestreo. Navidad 2015.....	38
18	Resultados de la prueba de comparación de medias para GA entre dosis de fertilización por muestreo. Navidad 2015.....	39
19	Resultados de la prueba de comparación de medias para GA entre grupos de triticales por muestreo. Navidad 2015.....	40
20	Resultados de los análisis de varianza para GGA por muestreo. Navidad 2015.....	41
21	Resultados de la prueba de comparación de medias para GGA entre dosis de fertilización por muestreo. Navidad 2015.....	42

22	Resultados de la prueba de comparación de medias para GGA entre grupos de triticales por muestreo. Navidad 2015.....	42
23	Coeficientes de correlación entre los parámetros e índices de vegetación utilizados en este estudio y la biomasa total (BIOTOT). Navidad 2015.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras		Pág.
1	Patrones de altura de planta de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.....	44
2	Patrones de etapa fenológica de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.....	44
3	Patrones de acumulación de biomasa (BIOTOT) de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.	45
4	Patrón de acumulación de área foliar (AF) de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.....	46
5	Lecturas de NDVI de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.....	47
6	Lecturas de GA de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.....	48
7	Lecturas de GGA de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.....	49
8	Relación entre lecturas de NDVI y área foliar (AF). Navidad 2015.....	50
9	Relación entre lecturas de NDVI y GA. Navidad 2015.....	50
10	Relación entre lecturas de NDVI y GGA. Navidad 2015.....	51
11	Relación entre área foliar (AF) y GA. Navidad 2015.....	51
12	Relación entre área foliar (AF) y GGA. Navidad 2015.....	52

INTRODUCCIÓN

La región semiárida del norte de México se caracteriza por presentar zonas agrícolas de riego altamente productivas, entre ellas, la Comarca Lagunera, ubicada en el Desierto Chihuahuense, además de otras regiones importantes para la producción de leche y carne de bovino, por lo que existe una alta demanda de forraje de calidad.

Por otra parte, existe mayor interés en la producción de forraje durante el invierno, pues hay menor evaporación, pero con el riesgo de heladas. Se requiere así de alternativas de producción que incluyan nuevas especies forrajeras principalmente de producción invernal, así como el conocimiento de sus tecnologías de producción, que lleven a una mayor disponibilidad de forraje de alta calidad, entre los cuales está el triticale, debido a su tolerancia a bajas temperaturas, suelos pobres, suelos ácidos, alcalinos y salinos, además de su resistencia a plagas y enfermedades, alto potencial de producción de biomasa y valor nutritivo superior al de los cultivos tradicionales, y particularmente a su mayor eficiencia en el uso del agua en la producción de biomasa (Ye *et al.*, 2001).

En el proceso de selección de nuevas variedades de cereales, se hace énfasis en varios rasgos morfofisiológicos, particularmente los relacionados con las características de rendimiento, la acumulación de materia seca y la eficiencia en el uso de los insumos (agua y fertilizantes), las cuales son usualmente eficaces como criterios de selección de germoplasma en diferentes condiciones ambientales. Sin embargo, las mediciones directas de esos rasgos por métodos tradicionales son destructivas y requieren mucho tiempo y trabajo, particularmente

cuando un gran número de genotipos necesitan evaluarse en diferentes ambientes. Para esto, se han desarrollado varios índices para estimar diversos parámetros agronómicos como la biomasa vegetal, el vigor de las plantas, la partición de biomasa y el rendimiento de grano. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es ampliamente utilizado a nivel para medir el verdor vegetativo y el tamaño fotosintético del dosel. Los sensores portátiles de campo proporcionan una medición rápida de los cultivos para caracterizar el dosel para el índice de área foliar (IAF) e índice de área verde (IAV), biomasa y contenido de nutrientes (por ejemplo, nitrógeno). Así, los datos pueden utilizarse para predecir en forma confiable el rendimiento, la acumulación de la biomasa y la tasa de crecimiento, además de la cobertura del suelo y el vigor temprano, el patrón de senescencia y la detección del estrés biótico y abiótico.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

- Determinar el efecto de la fertilización nitrogenada y la ausencia de fertilización sobre la producción de biomasa de triticales primaverales e invernales durante todo el ciclo del cultivo.
- Documentar la relación entre tres índices de vegetación y la producción de biomasa total con el objetivo de validar su eficacia en su estimación para evitar utilizar métodos destructivos en los dos diferentes tipos de triticales.

HIPÓTESIS

a) No existe diferencia en la producción de biomasa entre ambas dosis de fertilización.

b) No existe diferencia para la producción de biomasa entre los tipos de triticales evaluados.

c) No existe relación positiva entre los diferentes índices de vegetación y la producción de biomasa en los diferentes tipos de triticales.

REVISIÓN DE LITERATURA

Generalidades

El uso eficiente del agua y los fertilizantes en los forrajes está comenzando a ser un criterio para la selección de la especie o variedad a cultivar y que de esta manera brinde sustentabilidad en la producción. La elección correcta de los forrajes debe ser considerada en toda explotación lechera o pecuaria, e incluir el rendimiento, valor nutritivo, además de los costos y riesgos de producción (Neal *et al.*, 2010).

El triticale (*X Triticosecale* Wittmack.) puede utilizarse para tres fines agrícolas: a) producción de grano, b) producción de forraje y c) doble propósito, ya sea para corte ó pastoreo. Esta última modalidad en el uso de este cultivo está ganando popularidad en diversas regiones del norte y centro de México durante el ciclo otoño–invierno, debido a su potencial productivo y adecuada calidad nutritiva, la cual, en la etapa de encañe-embuche, es similar a la alfalfa (Collar y Aksland, 2001).

El triticale es un nuevo cultivo resultado de la cruce del centeno y el trigo; el objetivo en el mejoramiento de este nuevo cereal fue combinar las características deseables de las dos especies; alta productividad, adecuada resistencia a enfermedades y plagas, tolerancia al estrés, alta capacidad de absorción de nutrientes, tolerancia a déficits de humedad, calidad nutritiva superior y rápido establecimiento, lo que lo ha convertido en una buena opción como forraje de emergencia en comparación con los cultivos tradicionales como la avena, trigo o

cebada (Moore, 2005; Ozkan *et al.*, 1999; Ye *et al.*, 2001). De esta forma, el triticale es uno de los cultivos que por sus características antes mencionadas adquiere gran importancia como una alternativa para ayudar a solucionar el déficit de alimentos (NRC, 1989).

Tipos de triticale

Con base a su patrón productivo y hábito de crecimiento, en México se han desarrollado materiales de triticale para uso forrajero, principalmente para cortes múltiples o pastoreo (Lozano del Río, 2002). En este tipo de explotación es imprescindible la capacidad de rebrote de los genotipos, la cual depende principalmente del hábito de crecimiento y la etapa fenológica del corte, de las condiciones climáticas, las prácticas de manejo, la humedad y fertilidad del suelo y de la presión del corte o pastoreo, entre otras (Poysa, 1985).

Existen varios hábitos de crecimiento en este cultivo, generalmente agrupados en primaverales, invernales y facultativos (CIMMyT, 1976; Lozano del Río, 2002). Los triticales de hábito primaveral se caracterizan por su rápido crecimiento y diferenciación, sin requerimientos de vernalización, con crecimiento inicial erecto que favorece la cosecha mecánica, con amacollamiento reducido y baja capacidad de recuperación después del corte siendo adecuados para un solo corte. Los tipos invernales son convenientes para cortes o pastoreos múltiples. Los tipos facultativos son de rápido crecimiento y diferenciación, presentan crecimiento inicial semipostrado, amacollamiento intermedio y buena capacidad de recuperación después del corte o pastoreo, por lo que son adecuados para dos

cortes o pastoreos. Un cuarto tipo, intermedios- invernales, presentan crecimiento y diferenciación medios, semipostrados, con buen ahijamiento y alta capacidad de rebrote que permite dar cortes múltiples, sin ser tan tardíos como los tipos invernales (Lozano *et al.*, 2009; Royo *et al.*, 1995; Ye *et al.*, 2001). Estos últimos son excelentes en la producción de forraje para cortes o pastoreos múltiples debido a su capacidad de rebrote, alta calidad nutritiva, adecuado rendimiento de forraje seco y una mayor relación hoja-tallo, en comparación con los triticales facultativos, avena y trigo.

Efecto de la fertilización nitrogenada sobre los cultivos

La fertilización nitrogenada es uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo de los cultivos de cereales. Se considera que el nitrógeno (N), es el principal factor limitante en la producción agrícola (Kichey *et al.*, 2007) y, al igual que en otros cereales, es también uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo de triticales (*X Triticosecale* Wittmack). La disponibilidad de N para la planta es indispensable por ser un componente básico de todas las moléculas orgánicas involucradas en el crecimiento y desarrollo vegetal (Salas, 2003). Además, el N es un elemento indispensable para la fotosíntesis; para que las plantas fijen el carbono; para la acumulación de materia orgánica y la producción de rendimientos económicamente atractivos.

Newbould (1989), sostiene que la disponibilidad de N para los cultivos es en general deficiente, debido al manejo de suelos y a las pérdidas por lixiviación, por

lo que es posible que su aplicación no sea totalmente aprovechada por el cultivo en los estados de mayor requerimiento de este nutriente. Ello ocasiona que para satisfacer la demanda de los cultivos, el N deba agregarse al suelo en grandes cantidades como abono orgánico o fertilizante nitrogenado. Esto resulta relevante considerando el impacto ambiental de la lixiviación de N, que constituye un grave problema en algunos países industrializados (Newbould, 1989), por lo que la implementación de tecnologías de manejo del cultivo que incrementen la eficiencia en el uso de insumos fertilizantes se vuelven esenciales (Parodi, 2003). Aunque la práctica más utilizada para la aplicación de N es mediante la fertilización en siembra, el empleo de dosis elevadas de N que permitan la expresión del potencial de rendimiento de las variedades existentes en el mercado actual, requiere un manejo cuidadoso y eficiente de la parcialización del nutriente, esto con el fin de minimizar las pérdidas por lixiviación durante el desarrollo del cultivo, así como evitar la contaminación de capas freáticas y su efecto nocivo sobre la salud humana y la sostenibilidad ambiental (Campillo *et al.*, 2007). La importancia del momento de aplicación, además de la dosis de fertilizante empleado, puede también inducir un mejoramiento en la eficiencia de absorción, según investigaciones relacionadas con el cultivo de trigo (Campillo *et al.*, 2007) y cebada (Moreno *et al.*, 2003).

NDVI

Varios rasgos morfofisiológicos, particularmente los relacionados con los procesos de cultivo, las características de rendimiento, y los mecanismos de tolerancia a la sequía como el estado hídrico de las plantas, la eficiencia fotosintética, la conductancia estomática, la temperatura del dosel, la acumulación de materia seca, el índice de estrés y la eficiencia en el uso del agua son usualmente eficaces como criterios de selección complementarios útiles para la selección de germoplasma en diferentes condiciones ambientales. Sin embargo, las mediciones directas de esos rasgos por métodos tradicionales son destructivas y requieren mucho tiempo y algunas de ellas son difíciles de hacer cuando un gran número de genotipos necesitan ser evaluados en diferentes ambientes. Además, se han desarrollado varios índices optimizados para estimar mejor diversos parámetros agronómicos como la biomasa vegetal, el vigor de las plantas, el reparto de la biomasa entre las partes vegetativas y el rendimiento de grano. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es ampliamente utilizado a nivel del suelo, y desde altitudes bajas, altas y satélites para medir el verdor vegetativo y el tamaño fotosintético del dosel. El sensor NDVI portátil de campo proporciona una medición rápida del nivel del suelo de los cultivos a una resolución para caracterizar el dosel para: índice de área foliar (IAF) e índice de área verde (GAI), biomasa y contenido de nutrientes (por ejemplo, nitrógeno). Los datos pueden utilizarse para estimar la predicción del rendimiento, la acumulación de la biomasa y la tasa de crecimiento, la cobertura del suelo y el vigor temprano, las estimaciones del patrón de senescencia y la detección del estrés biótico y abiótico. La tecnología NDVI también se utiliza para tomar decisiones en

agricultura de precisión: detección de malezas y aplicación de herbicidas, además de dosis y calendario de aplicaciones de fertilizantes nitrogenados. El NDVI se calcula a partir de las mediciones de la reflectancia de la luz en las regiones del espectro rojo y el infrarrojo cercano (NIR). Un follaje verde y sano absorberá la mayor parte de la luz roja y reflejará la mayor parte de la luz NIR, ya que la clorofila absorbe principalmente la luz azul y roja y el mesófilo refleja la luz NIR: $NDVI = (RNIR - RRed) / (RNIR + RRed)$. Los sensores NDVI portátiles son “activos” (es decir, producen su propia fuente de luz) lo que permite realizar mediciones en cualquier condición de luz, y que los datos sean comparables entre la fecha y la hora del día.

El índice más comúnmente utilizado es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), propuesto por Rouse *et al.*, (1974) y calculado como el cociente de la diferencia y suma de la reflectancia en las regiones NIR (infrarrojo cercano) y rojo. Las partes verdes de las plantas se reflejan intensamente en la región NIR debido a la dispersión en el mesófilo foliar y absorben fuertemente la luz roja y azul a través de la clorofila (Ayala-Silva y Beyl, 2005). El índice NDVI se utiliza con mayor frecuencia para determinar la condición, el desarrollo y la biomasa de las plantas cultivadas y para predecir sus rendimientos. El NDVI se ha convertido en el índice de vegetación más utilizado (Wallace *et al.*, 2004, Calvao y Palmeirim, 2004); además se han realizado muchas investigaciones para desarrollar índices adicionales que puedan reducir el impacto del fondo y la atmósfera del suelo sobre los resultados de mediciones espectrales.

Área foliar

La dinámica del desarrollo de la hoja en las plantas de cereales es un paso clave necesario para estimar la radiación interceptada por el cultivo en la construcción de modelos de simulación para el crecimiento y la producción de cultivos. El conocimiento sobre la relación entre la fenología del cultivo y las condiciones ambientales representa un factor clave para la definición de algoritmos involucrados en la elaboración de modelos de predicción. Dentro de las etapas fenológicas más relevantes, la tasa de aparición de las hojas es la más importante, y las relaciones con los factores ambientales se han estudiado en trigo y cebada con el objetivo de comprender la dinámica del desarrollo del área foliar que intercepta la radiación solar (Kirby *et al.*, 1985; Kirby, 1990; Hay y Kirby, 1991; Miglietta, 1991a). Kirby (1990) ha demostrado que el desarrollo del tejido meristemático apical y la aparición de las hojas están estrechamente relacionados. Tanto la tasa de emisión foliar como el número final de hojas del tallo principal afectan algunos eventos fenológicos posteriores, como la inducción floral, el espigamiento y la floración, que a su vez influyen en el rendimiento y la calidad del cultivo (Amir y Sinclair, 1991). La tasa de aparición de las hojas (TAH) puede estimarse a partir de una tasa máxima potencial que puede disminuir en función de la temperatura y otros factores. En condiciones de campo, la temperatura del aire y la duración del día cambian considerablemente durante la temporada de crecimiento, afectando en cierta medida a los primordios foliares, TAH, la interceptación de luz del dosel y la fotosíntesis, el tiempo de floración, la acumulación de materia seca y el rendimiento (McMaster *et al.*, 2003). De acuerdo con Miglietta (1989, 1991b), la formación de primordios foliares en trigo duro y

harinero, en ausencia de estreses severos, depende sólo de la temperatura, mientras que es totalmente independiente del fotoperíodo, la fecha de siembra, la fertilización nitrogenada y el déficit de agua. Otros autores reportan el efecto del estrés hídrico, la disponibilidad de nutrientes, el CO₂ y la salinidad sobre la TAH, (Maas y Grieve, 1990; Longnecker *et al.*, 1993; McMaster *et al.*, 2003).

Acumulación de biomasa

La biomasa acumulada por las plantas es el producto final de la actividad fotosintética y es la reserva de nutrientes de la mayoría de las plantas. La porción de biomasa asignada a la producción de semilla en cereales se llama índice de cosecha. En cereales de grano pequeño, el rendimiento de grano está estrechamente relacionado con la producción de biomasa e índice de cosecha (Austin *et al.*, 1980). Comprender el proceso de la acumulación de biomasa durante la estación de crecimiento y la relación entre el rendimiento de grano y biomasa puede ayudar a alcanzar el más alto rendimiento a través de la nutrición y mejores prácticas agronómicas. Bajo condiciones de crecimiento óptimas, el rendimiento de grano normalmente se incrementa cuando se incrementa el total de materia seca y el consumo de nutrientes (Karlen y Camp, 1982).

Una tasa más alta de crecimiento resulta en un incremento final de biomasa, pero la tasa de crecimiento y fenología puede ser afectada por la sequía y el estrés dependiendo de la etapa de desarrollo del cultivo, de su duración e intensidad. Usualmente, el estrés de humedad combinado con altas temperaturas reduce la acumulación de materia seca (Shpiler y Blum, 1986).

Generalmente, los cultivos siguen un patrón de acumulación de biomasa similar en varias etapas de crecimiento, un incremento en la biomasa en etapas tempranas alcanza la máxima producción en las etapas tardías de crecimiento. La biomasa y la absorción de nutrientes en todas las especies aumentan con el tiempo y alcanza su máximo en las últimas etapas de crecimiento (Malhi *et al.*, 2006).

Análisis de imágenes digitales

La evaluación de la biomasa tiene una gran importancia en los programas de mejoramiento de cereales, y se necesitan estimaciones confiables de esta característica. Se requieren métodos disponibles y fáciles de usar para evaluar la biomasa y el índice de área foliar (IAF) para utilizarlos en la mayoría de los programas de mejoramiento. Los métodos directos para medir la biomasa y IAF consisten en recolectar las muestras en el campo, transportarlas al laboratorio, determinar el área de las hojas para obtener el área foliar y el IAF y / o secarlas en el horno y, finalmente, pesar la biomasa para medirla (Villegas *et al.* 2001; Royo *et al.* 2004). El trabajo involucrado implica que puede ser demasiado costoso o inviable para un gran número de líneas experimentales. Además, es destructivo y consume parte del cultivo, lo que puede ser un problema dado el pequeño tamaño de algunas parcelas.

En este contexto, se han propuesto métodos ópticos no destructivos. Varios estudios han analizado la aplicabilidad de los índices de vegetación basados en la reflectancia espectral (Aparicio *et al.*, 2002; Royo *et al.*, 2003; Haboudane *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2007; Prasad *et al.*, 2007). Sin embargo, requieren equipo especializado. Se han propuesto cámaras convencionales como herramientas de

selección en programas de mejoramiento de cereales (Casadesús *et al.*, 2007; Mullan y Reynolds, 2010), ya que el muestreo fotográfico puede ser rentable porque se puede obtener una gran cantidad de muestras con el mínimo esfuerzo.

Las cámaras digitales convencionales pueden proporcionar un método más conveniente ya que están disponibles, son portátiles y fáciles de usar. La fotografía digital se ha utilizado para cuantificar características de plantas como el área foliar (Baker *et al.*, 1996; Lukina *et al.*, 1999; Campillo *et al.*, 2008, Lati *et al.*, 2011), así como la senescencia de las hojas (Adamsen *et al.*, 1999 ; Ide y Oguma, 2010) o cobertura de pastizales (Li *et al.*, 2005). Además, las imágenes son de usos múltiples. Una vez que se han utilizado para evaluar la biomasa, también pueden ser útiles para verificar otras características, como la presencia de enfermedades, la densidad de las plantas y su distribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Sitio Experimental

El presente estudio se realizó durante el ciclo otoño - invierno 2014-2015 en el Campo Agrícola Experimental de la UAAAN, en Navidad, N. L., ubicado entre las coordenadas 25° 04´ latitud Norte y 100° 56´ longitud Oeste del meridiano de Greenwich, con una altitud de 1,895 msnm.

Desarrollo del Experimento

Material genético utilizado

En el Cuadro 1 se presenta la lista de los 12 genotipos utilizados en los experimentos, de los cuales 4 fueron líneas experimentales de triticale con hábito de crecimiento primaveral, 2 del tipo facultativo, 2 del tipo intermedio-invernal y 4 de hábito invernal, que fueron proporcionados por el Proyecto Triticale del Programa de Cereales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Para esta investigación, y con propósito comparativo, fueron utilizados los datos de las variables registradas sólo de los genotipos de hábito primaveral e invernal, (Cuadro 1), los cuales fueron agrupados originalmente por su hábito de crecimiento (variedades 1-4 y 9-12, Grupos 1 y 4), respectivamente. Para este estudio, se referirán como primaverales (Grupo 1) e invernales (Grupo 2).

Cuadro 1. Lista de genotipos y sorteo utilizados en el Experimento. Navidad, N.L. Ciclo 2014 – 2015.

Trat.	Descripción	R1 Parcela	R2 Parcela	R3 Parcela	Hábito de crecimiento y grupo
V1	AN-123	1	14	26	G1-Primaveral
V2	AN-125	2	21	32	G1-Primaveral
V3	AN-137	3	19	34	G1-Primaveral
V4	ERONGA 83	4	17	29	G1-Primaveral
V5	AN-105	5	24	36	G2-Facultativo
V6	AN-38	6	13	31	G2-Facultativo
V7	AN-66	7	18	25	G3-Intermedio-invernal
V8	AN-184	8	22	33	G3-Intermedio-invernal
V9	ABT	9	16	35	G4-Invernal
V10	AN-31B	10	20	28	G4-Invernal
V11	ANPELON	11	23	30	G4-Invernal
V12	AN-34	12	15	27	G4-Invernal

Preparación del terreno

Se realizaron las labores que tradicionalmente se utilizan para la siembra de cereales en la región, esto es, barbecho, rastreo y doble nivelación.

Fecha de siembra

La siembra se realizó en húmedo el 16 de Enero de 2015 durante el ciclo otoño-invierno 2014-2015. Esta se realizó manualmente, a chorrillo, depositando la semilla en el fondo del surco y tapando posteriormente con el pie.

Tamaño de parcela experimental

Cada unidad experimental estuvo conformada por 12 surcos de 5 m de largo por 30 cm entre hileras (18.0 m²).

Fertilización

A la siembra, en cada unidad experimental (12 surcos), se aplicó a la mitad de la parcela (6 surcos) una dosis de fertilización de 80-00-00, utilizando como fuente urea (46% N). A los seis surcos restantes no se les aplicó fertilizante (00-00-00).

Riegos

Al experimento se le aplicó un riego inmediatamente después de la siembra con un sistema de aspersion; posteriormente, se aplicaron 4 riegos adicionales en las etapas de amacollamiento, encañe, floración y llenado de grano, dando un total de 50 cm de lámina (aproximadamente 10 cm de lámina por riego).

Control de plagas, enfermedades y malezas.

Debido a que no se presentó incidencia de plagas y enfermedades no se realizó control de ningún tipo; el control de malezas, como la incidencia no fue severa, se realizó manualmente.

Muestreos

Se realizaron 11 muestreos destructivos secuenciales de biomasa: Las fechas de muestreo fueron las siguientes:

M1: 25/03/2015: (69 días después de la siembra)

M2: 03/04/2015: (78 días después de la siembra)

M3: 15/04/2015: (90 días después de la siembra)

M4: 24/04/2015: (99 días después de la siembra)

M5: 01/05/2015: (106 días después de la siembra)

M6: 08/05/2015: (113 días después de la siembra)

M7: 14/05/2015: (119 días después de la siembra)

M8: 21/05/2015: (126 días después de la siembra)

M9: 27/05/2015: (132 días después de la siembra)

M10: 03/06/2015: (139 días después de la siembra)

M11: 11/06/2015: (147 días después de la siembra)

Los muestreos se realizaron manualmente, con rozadera, cortando el forraje en 50 cm lineales de un surco con competencia completa, tanto en la subparcela

fertilizada como en la no fertilizada, aproximadamente a 2 cm sobre la superficie del suelo. Posteriormente en laboratorio se separaron las hojas, tallos y en su caso, espigas de cada parcela, se secaron en estufa a 60° por 72 h y se registró el peso seco de cada componente.

Diseño experimental utilizado en campo

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones por tratamiento.

Variables registradas

- Altura de planta (**ALTURA**): En cada unidad experimental y en cada muestreo, se registró en cm.

- Etapa fenológica (**ETAPA**): Se registró en cada unidad experimental y en cada muestreo, utilizando la escala de Zadoks *et al.*, (1974).

- Biomasa seca total (**BIOTOT**): En cada unidad experimental y en cada muestreo, se determinó al sumar los pesos de hojas, tallos y en su caso, espigas, posteriormente se transformó a biomasa seca total en t /ha.

- Área foliar (**AF**): Antes de cada muestreo de biomasa, se evaluó el área foliar de cada muestra de forraje mediante un integrador marca LICOR 3000 y se registró en cm².
- índice de vegetación normalizada (**NDVI**): Antes de cada muestreo de biomasa, se tomaron lecturas del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) mediante un sensor óptico marca GreenSeeker.
- Análisis de imágenes digitales (**GA y GGA**):
 1. Antes de cada muestreo de biomasa, el muestreo fotográfico consistió en caminar a través del campo siguiendo las parcelas experimentales de acuerdo con su disposición espacial a lo largo de un patrón preestablecido. Las imágenes se obtuvieron mientras se caminaba, sin detenerse, con la cámara sujeta con la mano por encima del dosel de cada parcela a la altura del hombro, con el brazo del fotógrafo extendido hacia el centro de la parcela. La posición de la cámara fue de aproximadamente 150 cm de altura, aproximadamente 50 cm desde el borde de cada parcela y orientada hacia abajo. La cámara utilizada fue una NIKON D70 con un objetivo NIKKOR de 18–70 mm a la distancia focal mínima, enfocando al infinito y configurada para una apertura fija de F3.5 y tiempo de exposición automatizada, que osciló entre 1/400 y 1/250. Las imágenes fueron de 1504 x 1000 píxeles.
 2. Procesamiento de las imágenes. Después de cada muestreo, las imágenes se descargaron a una PC y se procesaron con el software

BreedPix versión 1.0, que se puede obtener de forma gratuita de los autores y se basa en lo descrito en Casadesús *et al.*, (2007). Los procedimientos para calcular los índices de vegetación fueron los mismos que los descritos en Casadesús *et al.*, (2007): área verde (GA) y área más verde (GGA). Básicamente, los índices se basan en el color promedio de toda la imagen, en diversas unidades relacionadas con su "verdor", o en la fracción de píxeles clasificados como dosel verde en relación con el número total de píxeles de la imagen. De esta forma, el parámetro GA, correspondió a la proporción de píxeles verdes en una imagen, incluyendo las hojas secas o senescentes, donde un píxel se considera verde si su tono está dentro del rango 60–180 °. En el caso del parámetro GGA, este cuantifica la fracción de la cubierta verde totalmente funcional, excluyendo los píxeles amarillentos que pueden corresponder a hojas senescentes, y se calculó como la proporción de píxeles cuyo tono está dentro del rango 80–180 °.

Análisis estadísticos

Se efectuaron análisis de varianza por muestreo. En cada muestreo, los datos fueron analizados agrupando los genotipos por su hábito de crecimiento (2), dentro de cada dosis de fertilización (2).

Modelo estadístico de los análisis de varianza por muestreo para las variables en estudio.

$$Y_{ijk} = : \mu + R_i + r_j (R) + G_k + R_i G_k + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Variable observada.

μ : = Efecto de la media general.

R_i = Efecto de la i -ésima fertilización

$r_j (R)$ = Efecto de la j -ésima repetición dentro de la i -ésima fertilización.

G_k = Efecto del k -ésimo grupo.

$M_i G_k$ = Efecto de la interacción del k -ésimo grupo en la i -ésima fertilización.

E_{ijk} = Error experimental.

Pruebas de comparación de medias

Se realizaron pruebas de comparación de medias por muestreo para las variables estudiadas, entre dosis de fertilización y grupos, utilizando la prueba de Tukey al nivel de probabilidad registrada en el correspondiente análisis de varianza.

Se calculó el coeficiente de variación para la variable estudiada, esto con la finalidad de verificar el grado de precisión con la que se realizó el experimento utilizando la siguiente fórmula:

$$C.V. = \sqrt{\frac{CMEE}{\bar{x}}} \times 100$$

Donde:

CMEE = Cuadrado medio del error experimental.

\bar{X} = Media general del carácter.

Tanto los análisis de varianza como las pruebas de comparación de medias se realizaron con el paquete estadístico SAS 8.1. Las gráficas se realizaron con el paquete estadístico STATISTICA 7.0

RESULTADOS

ALTURA

Los resultados de los análisis de varianza (Cuadro 2), reportaron diferencias altamente significativas entre las dosis de fertilización en todos los muestreos realizados; entre repeticiones dentro de dosis de fertilización no se registraron diferencias significativas, excepto en el muestreo 5, que fue significativo. Entre los grupos de genotipos se registraron diferencias altamente significativas en todos los muestreos, excepto en el 7°, que sólo fue significativo. En la interacción DF*GRUPOS no se registraron diferencias estadísticas, excepto en el muestreo 4. Los coeficientes de variación oscilaron entre 9.4 y 13.7 %, dependiendo del muestreo.

Cuadro 2. Resultados de los análisis de varianza para altura por muestreo.

ALTURA												
FV	GL	CUADRADOS MEDIOS										
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
DF	1	1750.02 **	1877.77 **	1495.11 **	5220.06 **	5738.06 **	5865.00 **	11253.67 **	12376.56 **	17292.25 **	17866.77 **	18000.69 **
REP (DF)	4	8.80 ns	12.76 ns	5.30 ns	6.28 ns	231.97 *	49.31 ns	94.04 ns	61.59 ns	264.47 ns	48.48 ns	18.36 ns
GRUPOS	1	650.25 **	1332.25 **	3287.11 **	3451.56 **	7267.56 **	1827.56 **	333.06 *	2360.34 **	3364.00 **	7861.77 **	13072.11 **
DF*GRUPOS	1	7.11 ns	6.25 ns	11.11 ns	370.56 *	27.56 ns	57.50 ns	166.84 ns	430.56 ns	0.44 ns	1.77 ns	3.36 ns
ERROR	136	6.32	9.90	26.50	61.48	73.73	64.12	69.35	114.83	146.17	142.95	129.60
TOTAL	143											
X GENERAL		24.5	28.3	40.5	57.1	66.5	79.5	88.0	94.3	98.3	100.8	103.0
CV %		10.2	11.1	12.6	13.7	12.9	10.0	9.4	11.3	12.2	11.8	11.0

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

El cuadro 3 muestra los resultados de la comparación de medias entre dosis de fertilización. El experimento con fertilización nitrogenada dio como resultado valores significativamente mayores de altura en comparación con el experimento sin fertilización en todos los muestreos.

Cuadro 3. Resultados de la prueba de comparación de medias de altura entre dosis de fertilización por muestreo.

ALTURA											
DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	28.0 a	31.9 a	43.8 a	63.1 a	72.8 a	85.8 a	96.9 a	103.6 a	109.3 a	112.0 a	114.2 a
2	21.0 b	24.7 b	37.3 b	51.0 b	60.2 b	73.1 b	79.2 b	85.0 b	87.3 b	89.7 b	91.8 b
DMS α 0.05	1.3	1.6	1.0	1.1	7.0	3.2	4.4	3.6	7.5	3.2	1.9

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

El Cuadro 4 muestra los resultados de la prueba de comparación de medias entre los grupos de triticales para altura. En los resultados obtenidos se observa que existieron diferencias estadísticas entre los grupos en todos los muestreos; los triticales primaverales registraron significativamente mayor altura que los triticales de crecimiento más lento (invernales) en los primeros 6 muestreos, sin embargo, estos últimos registraron significativamente mayor altura al final del ciclo.

Cuadro 4. Resultados de la prueba de comparación de medias de altura entre grupos de triticales por muestreo.

ALTURA											
Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	26.7 a	31.3 a	45.3 a	62.0 a	73.6 a	83.0 a	86.5 b	90.3 b	93.5 b	93.5 b	93.5 b
2	22.4 b	25.2 b	35.8 b	52.2 b	59.4 b	75.9 b	89.6 a	98.4 a	103.1 a	108.2 a	112.5 a
DMS α 0.05	0.8	1.0	1.6	2.5	2.8	2.6	2.7	3.5	3.9	3.9	3.7

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

ETAPA

En el Cuadro 5 presentan los resultados de los análisis de varianza para esta variable, para las dosis de fertilización únicamente se registró diferencia altamente significativa en los muestreos 1 y 2, a excepción de los muestreos 3 y 7 que fueron solamente significativos, mientras que para el resto no se presentaron diferencias estadísticas significativas; entre grupos de genotipos se reportó diferencia significativa en el primer muestreo, mientras que para el resto fueron altamente significativos. La interacción DF*GRUPOS no registró significancia estadística en ninguno de los muestreos. Los coeficientes de variación variaron entre 2.2 y 7.5 %, dependiendo del muestreo.

Cuadro 5. Resultados de los análisis de varianza para etapa por muestreo.

ETAPA		CUADRADOS MEDIOS										
FV	GL	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
DF	1	12.25 **	78.02 **	28.44 *	9.50 ns	5.68 ns	46.69 ns	40.74 *	8.41 ns	2.66 ns	4.73 ns	11.50 ns
REP (DF)	4	0.20 ns	0.65 ns	0.72 ns	7.05 ns	3.29 ns	8.38 ns	13.33 ns	5.48 ns	11.19 ns	6.86 ns	5.31 ns
GRUPOS	1	8.02 *	36.00 **	641.77 **	2817.84 **	1916.98 **	2773.77 **	867.30 **	973.44 **	1146.95 **	1736.80 **	274.17 **
DF*GRUPOS	1	0.11 ns	0.11 ns	2.25 ns	18.06 ns	0.61 ns	38.02 ns	0.20 ns	0.36 ns	16.53 ns	24.91 ns	14.25 ns
ERROR	136	1.34	0.49	5.97	9.02	8.01	24.82	6.16	6.66	8.66	9.51	6.62
TOTAL	143											
X GENERAL		22.6	31.4	41.2	53.0	56.9	66.2	71.3	74.2	77.3	82.6	84.7
CV %		5.1	2.2	5.9	5.6	4.9	7.5	3.4	3.4	3.8	3.7	3.0

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

En el Cuadro 6 se presentan los resultados de las comparaciones de medias entre dosis de fertilización para ETAPA. En los primeros 3 muestreos el experimento con fertilización nitrogenada registró significativamente una fenología más avanzada de los genotipos en comparación con el experimento sin fertilización, no así en los muestreos finales, donde no se registraron diferencias estadísticas en la fenología de los genotipos con respecto a las dosis de fertilización.

Cuadro 6. Resultados de la prueba de comparación de medias de etapa entre dosis de fertilización por muestreo.

ETAPA											
DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	22.9 a	32.1 a	41.6 a	53.3 a	57.1 a	66.7 a	71.9 a	74.4 a	77.4 a	82.8 a	85.0 a
2	22.3 b	30.7 b	40.7 b	52.8 a	56.7 a	65.6 a	70.8 a	73.9 a	77.2 a	82.4 a	84.4 a
DMS α 0.05	0.2	0.3	0.3	1.2	0.8	1.3	1.6	1.0	1.5	1.2	1.0

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

El Cuadro 7 muestra los resultados de la prueba de comparación de medias entre grupos de triticales para ETAPA. En este Cuadro se observa que al inicio del ciclo (muestreo1), se registró diferencia estadística entre los grupos de genotipos; sin embargo, en forma general, a partir del 2° muestreo, los genotipos de hábito primaveral (Grupo 1), registraron significativamente mayores valores de etapa con respecto al grupo 2 (invernales), demostrando una mayor precocidad que los tipos netamente invernales, lo cual es una ventaja para los productores, dependiendo de su tipo de explotación, ya que si el objetivo es producir heno o grano, o un solo corte para verdeo, significa un menor tiempo en terreno, tanto para llegar más rápido a corte como para producción de grano.

Cuadro 7. Resultados de la prueba de comparación de medias de etapa entre grupos de triticale por muestreo.

ETAPA											
Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	22.3 b	31.9 a	43.3 a	57.4 a	60.6 a	70.6 a	73.8 a	76.8 a	80.1 a	86.1 a	86.1 a
2	22.8 a	30.9 b	39.0 b	48.6 b	53.3 b	61.8 b	68.9 b	71.6 b	74.5 b	79.2 b	83.3 b
DMS α 0.05	0.3	0.2	0.8	0.9	0.9	1.6	0.8	0.8	0.9	1.0	0.8

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

BIOTOT

En el Cuadro 8 se presentan los resultados de los análisis de varianza para esta variable; se registraron diferencias altamente significativas entre dosis de fertilización en todos los muestreos; para repeticiones dentro de dosis de fertilización no se registraron diferencias estadísticas en ninguno de los muestreos. Entre los grupos de genotipos se registraron diferencias altamente significativas en la mayoría de los muestreos, exceptuando a los muestreos 1 y 11, en los cuales no se presentaron diferencias estadísticas; para la interacción DF*GRUPOS no se registraron diferencias significativas. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 29.3 y 54.4 %, dependiendo del muestreo.

Cuadro 8. Resultados de los análisis de varianza para biomasa total por muestreo.

BIOTOT												
FV	GL	Cuadrados medios										
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
DF	1	0.90 **	6.89 **	18.88 **	57.64 **	38.37 **	216.10 **	155.25 **	308.69 **	384.12 **	442.15 **	565.82 **
REP (DF)	4	0.07 ns	0.25 ns	1.77 ns	1.03 ns	2.00 ns	1.22 ns	1.39 ns	1.53 ns	0.85 ns	9.07 ns	2.50 ns
GRUPOS	1	0.15 ns	1.39 **	26.63 **	29.14 **	54.17 **	81.33 **	122.83 **	89.68 **	85.49 **	86.59 **	4.66 ns
DF*GRUPOS	1	0.02 ns	0.03 ns	0.19 ns	0.34 ns	0.85 ns	1.12 ns	1.74 ns	0.15 ns	5.79 ns	1.18 ns	2.78 ns
ERROR	136	0.08	0.14	1.14	1.59	3.07	3.77	3.51	4.61	5.88	6.87	7.16
TOTAL	143											
X GENERAL		0.953	1.290	2.555	2.987	3.223	5.296	5.705	6.372	6.824	7.589	8.185
CV %		30.2	29.3	41.9	42.2	54.4	36.6	32.8	33.7	35.5	34.5	32.7

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

El Cuadro 9 muestra los resultados y tendencias de la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización. Los genotipos con fertilización nitrogenada produjeron en forma general cantidades significativamente mayores de biomasa que los genotipos sin fertilización en todos los muestreos, indicando la importancia de la fertilización nitrogenada en la construcción de las estructuras vegetales de las plantas (hojas, tallos, espigas) documentada extensamente en la literatura científica.

Cuadro 9. Resultados de la prueba de comparación de medias para BIOTOT entre dosis de fertilización por muestreo.

BIOTOT											
DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	1.032 a	1.509 a	2.917 a	3.620 a	3.740 a	6.5213 a	6.743 a	7.836 a	8.457 a	9.342 a	10.167 a
2	0.873 b	1.071 b	2.192 b	2.355 b	2.707 b	4.071 b	4.666 b	4.908 b	5.190 b	5.837 b	6.202 b
DMS α 0.05	0.1	0.2	0.6	0.4	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	1.3	0.7

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

El Cuadro 10 muestra los resultados de la prueba de comparación de medias entre grupos de triticales para BIOTOT. En este cuadro se observa que en forma general, en el primer y último muestreo no se registraron diferencias estadísticas entre los grupos de genotipos, sin embargo del muestreo 2° al 10° se registraron diferencias estadísticas significativas, ya que el grupo 1 (primaverales) registró significativamente mayor cantidad de biomasa total con respecto al grupo 2 (invernales), indicado por la diferencia en rendimiento de BIOTOT en la mayoría de los muestreos, que aproximadamente fue de un 22% mayor.

Cuadro 10. Resultados de la prueba de comparación de medias de biomasa entre grupos de triticales por muestreo.

BIOTOT											
Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	0.985 a	1.389 a	2.985 a	3.437 a	3.837 a	6.047 a	6.628 a	7.161 a	7.594 a	8.365 a	8.365 a
2	0.921 a	1.192 b	2.125 b	2.538 b	2.610 b	4.544 b	4.781 b	5.583 b	6.053 b	6.814 b	8.005 a
DMS α 0.05	0.0	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

AF

En el Cuadro 11 se muestran los resultados de los análisis de varianza para esta variable, donde se registraron diferencias altamente significativas entre las dosis de fertilización a través de todos los muestreos, indicando así la importancia de la fertilización nitrogenada para el desarrollo de las hojas (área foliar), sin importar el hábito de crecimiento de los materiales. Con respecto a los grupos de genotipos se registraron diferencias altamente significativas en los muestreos 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11, mientras que para el muestreo 2 sólo fue significativo; para la interacción DF*Grupos, se registró significancia en los muestreos 4, 5, 6, 7, 8 y 9, lo cual indica que los materiales tardíos presentaron un mayor desarrollo foliar. Los coeficientes de variación para esta variable fluctuaron entre 18.5 y 72.1 %, dependiendo del muestreo

Cuadro 11. Resultados de los análisis de varianza para área foliar por muestreo.

AF												
FV	GL	Cuadrados medios										
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
DF	1	138092.75 **	230984.37 **	475318.32 **	643204.00 **	456897.13 **	306113.22 **	219281.47 **	127669.24 **	72043.03 **	20774.41 **	6835.15 **
REP (DF)	4	52.49 ns	484.71 ns	334.32 ns	590.94 ns	478.81 ns	382.73 ns	224.20 ns	812.72 ns	62.50 ns	147.29 ns	89.42 ns
GRUPOS	1	13303.70 **	8243.12 *	516.04 ns	251585.84 **	189087.27 **	149994.83 **	73888.83 **	51057.16 **	37671.57 **	22116.64 **	15369.80 **
DF*GRUPOS	1	3064.54 ns	2124.44 ns	2676.33 ns	32670.56 **	22980.03 **	28840.53 **	17364.65 **	7946.23 **	4755.25 **	2017.50 ns	1091.75 ns
ERROR	136	830.25	986.54	1377.68	1277.40	2071.56	1335.92	1021.90	1040.11	453.15	563.89	335.18
TOTAL	143											
X GENERAL		119.577	150.275	177.298	192.944	166.802	141.420	109.021	88.221	69.409	42.444	25.364
CV %		24.0	20.9	20.9	18.5	27.2	25.8	29.3	36.5	30.6	55.9	72.1

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

Los resultados de la comparación de medias de área foliar entre dosis de fertilización (Cuadro 12), indicaron que los genotipos con fertilización nitrogenada registraron valores significativamente mayores que los tratamientos sin fertilizar, independientemente de su hábito de crecimiento, por lo cual se resalta la importancia de la fertilización nitrogenada en el desarrollo del área foliar y de las estructuras en general de las plantas, ya que en forma general, el área foliar de los genotipos fertilizados con nitrógeno fue en promedio, el doble de la que presentaron los genotipos sin aplicación de este nutriente.

Cuadro 12. Resultados de la prueba de comparación de medias de área foliar entre dosis de fertilización por muestreo.

AF											
DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	150.544 a	190.326 a	234.751 a	259.778 a	223.131 a	187.526 a	148.044 a	117.997 a	91.776 a	54.456 a	32.254 a
2	88.610 b	110.225 b	119.846 b	126.111 b	110.474 b	95.314 b	69.999 b	58.446 b	47.042 b	30.443 b	18.475 b
DMS α 0.05	3.3	10.1	8.4	11.2	10.1	9.0	6.9	13.1	3.6	5.6	4.3

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

El Cuadro 13 muestra los resultados de la prueba de comparación de medias entre grupos de triticales para AF. En este se observa que sólo en los muestreos 1 y 2 se registraron diferencias estadísticas entre los grupos, con ventaja para los materiales primaverales (Grupo 1), que presentaron significativamente mayor área foliar con respecto a los materiales invernales; sin embargo, a partir del cuarto muestreo, los tipos invernales (Grupo 2), registraron significativamente una mayor área foliar, por lo que para efectos de producción de forraje con alta proporción de hojas (follaje), son los más adecuados en la producción de forraje de alta calidad.

Cuadro 13. Resultados de la prueba de comparación de medias de área foliar entre grupos de triticales por muestreo.

AF											
Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	129.189 a	157.842 a	175.406 a	151.146 b	130.565 b	109.146 b	86.369 b	69.392 b	53.235 b	30.051 b	15.033 b
2	109.965 b	142.710 b	179.192 a	234.743 a	203.039 a	173.694 a	131.674 a	107.051 a	85.583 a	54.838 a	35.696 a
DMS α 0.05	9.4	10.3	12.2	11.7	15.0	12.0	10.5	10.6	7.0	7.8	6.0

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

NDVI

Los resultados de los análisis de varianza para los valores de NDVI (Cuadro 14), registraron diferencias altamente significativas entre dosis de fertilización en todos los muestreos, sin importar el tipo de crecimiento de los materiales. Entre grupos no se obtuvieron diferencias significativas en los primeros 3 muestreos, a excepción de los muestreos 4 y 5 que fueron significativos, mientras que para el resto de los muestreos fueron altamente significativos; en la interacción DF*GRUPOS no se registraron diferencias estadísticas, a excepción de los muestreos 7, 8 y 10. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 10.1 y 25.0 %, dependiendo del muestreo. Ya que el NDVI estima la proporción de estructuras verdes de las plantas (principalmente hojas), se corrobora la similitud entre ambos tipos de triticales al inicio del ciclo de crecimiento, y posteriormente la ventaja de los tipos invernales, ya señalada anteriormente en los resultados entre los mismos para el área foliar (AF).

Cuadro 14. Resultados de los análisis de varianza para NDVI por muestreo.

NDVI												
FV	GL	Cuadrados Medios										
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
DF	1	0.9441 **	1.2469 **	1.8746 **	1.0902 **	0.7995 **	0.5525 **	0.4334 **	0.3751 **	0.2871 **	0.1207 **	0.0345 **
REP (DF)	4	0.0053 ns	0.0009 ns	0.0005 ns	0.0009 ns	0.0008 ns	0.0030 ns	0.0046 ns	0.0004 ns	0.0037 ns	0.0026 ns	0.0032 ns
GRUPOS	1	0.0006 ns	0.0002 ns	0.0014 ns	0.0134 *	0.0146 *	0.0225 **	0.0434 **	0.0532 **	0.1050 **	0.3164 **	0.8510 **
DF*GRUPOS	1	0.0009 ns	0.0010 ns	0.0015 ns	0.0068 ns	0.0088 ns	0.0056 ns	0.0152 *	0.0126 *	0.0062 ns	0.0146 *	0.0050 ns
ERROR	136	0.0039	0.0025	0.0021	0.0020	0.0025	0.0027	0.0028	0.0028	0.0031	0.0024	0.0020
TOTAL	143											
X GENERAL		0.44	0.50	0.55	0.47	0.42	0.39	0.37	0.35	0.30	0.24	0.18
CV %		14.0	10.1	8.4	9.6	11.7	13.2	14.3	15.2	18.3	19.7	25.0

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

El Cuadro 15 muestra los resultados y tendencias de la comparación de medias entre dosis de fertilización para NDVI. El experimento con fertilización nitrogenada registró en forma general valores significativamente mayores de NDVI que el experimento sin fertilización. Lo anterior confirma la importancia del nitrógeno en la construcción de una mayor área foliar que incide directa y positivamente en mayores lecturas de NDVI

Cuadro 15. Resultados de la prueba de comparación de medias de NDVI entre dosis de fertilización por muestreo.

NDVI											
DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	0.52 a	0.59 a	0.66 a	0.55 a	0.50 a	0.45 a	0.42 a	0.40 a	0.35 a	0.27 a	0.19 a
2	0.36 b	0.40 b	0.43 b	0.38 b	0.35 b	0.33 b	0.31 b	0.30 b	0.26 b	0.22 b	0.16 b
DMS α 0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.02	0.02	0.02

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

El Cuadro 16 muestra los resultados de la prueba de comparación de medias entre grupos de triticales para valores de NDVI. En este Cuadro se observa que no se registró diferencia estadística entre los grupos de genotipos de los primeros tres muestreos; sin embargo, en el resto de los muestreos, en el grupo 2 (invernales), se registraron valores significativamente mayores de NDVI que los triticales de hábito primaveral-invernal (grupo 1). Por lo tanto, se corrobora la ventaja para los tipos invernales ya señalada anteriormente en los resultados entre los mismos para el área foliar (AF) que incide directamente en mayores lecturas de NDVI.

Cuadro 16. Resultados de la prueba de comparación de medias de NDVI entre grupos de triticales por muestreo.

NDVI											
Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	0.44 a	0.50 a	0.54 a	0.46 b	0.41 b	0.38 b	0.35 b	0.33 b	0.27 b	0.20 b	0.10 b
2	0.44 a	0.50 a	0.55 a	0.48 a	0.43 a	0.40 a	0.39 a	0.37 a	0.33 a	0.29 a	0.25 a
DMS α 0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

GA

Para esta variable, la cual considera la cantidad de píxeles originados de las fotografías digitales, e incluyen las hojas verdes y las senescentes, y que están relacionadas con el área foliar (follaje) de los genotipos, los resultados de los análisis de varianza (Cuadro 17), reportaron diferencias altamente significativas entre las dosis de fertilización en la mayoría de los muestreos, exceptuando al muestreo 11, que sólo fue significativo, y el muestreo 10, que fue no significativo; para repeticiones dentro de dosis de fertilización no se registraron diferencias significativas. Entre los grupos de genotipos se registraron diferencias altamente significativas en los muestreos 9, 10 y 11; para la interacción DF*GRUPOS no se registraron diferencias significativas. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 6.5 y 48.4 %, dependiendo del muestreo.

Cuadro 17. Resultados de los análisis de varianza para GA por muestreo.

GA												
FV	GL	Cuadrados Medios										
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
DF	1	0.5763 **	1.0423 **	2.2233 **	1.3706 **	0.3586 **	0.5862 **	0.6178 **	0.3761 **	0.2433 **	0.0268 ns	0.0157 *
REP (DF)	4	0.0016 ns	0.0005 ns	0.0035 ns	0.0053 ns	0.0088 ns	0.0056 ns	0.0109 ns	0.0022 ns	0.0008 ns	0.0011 ns	0.0004 ns
GRUPOS	1	0.0048 ns	0.0000 ns	0.0000 ns	0.0078 ns	0.0029 ns	0.0053 ns	0.0026 ns	0.0239 ns	0.4592 **	0.1872 **	0.0664 **
DF*GRUPOS	1	0.0000 ns	0.0003 ns	0.0000 ns	0.0049 ns	0.0000 ns	0.0001 ns	0.0033 ns	0.0000 ns	0.0000 ns	0.0026 ns	0.0011 ns
ERROR	136	0.0021	0.0022	0.0033	0.0051	0.0052	0.0039	0.0103	0.0114	0.0120	0.0139	0.0029
TOTAL	143											
X GENERAL		0.575	0.715	0.659	0.637	0.671	0.544	0.521	0.461	0.446	0.325	0.111
CV %		8.0	6.5	8.7	11.2	10.7	11.5	19.4	23.1	24.6	36.2	48.4

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

Los resultados de la prueba de comparación de medias de GA entre dosis de fertilización (Cuadro 18), indicaron en forma general que los tratamientos con fertilización nitrogenada registraron valores significativamente mayores que los tratamientos sin fertilizar, por lo cual se comprueba la importancia del nitrógeno en el desarrollo del área fotosintéticamente activa (follaje) de las plantas y por lo tanto, de mayores valores de GA.

Cuadro 18. Resultados de la prueba de comparación de medias de GA entre dosis de fertilización por muestreo.

GA											
DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	0.639 a	0.800 a	0.783 a	0.735 a	0.721 a	0.608 a	0.586 a	0.512 a	0.487 a	0.339 a	0.122 a
2	0.512 b	0.630 b	0.535 b	0.540 b	0.621 b	0.480 b	0.455 b	0.410 b	0.405 b	0.312 b	0.101 b
DMS α 0.05	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

El Cuadro 19 muestra los resultados de la prueba de comparación de medias entre grupos de triticales para GA. En este se observa que en la mayoría de los muestreos no se registraron diferencias estadísticas entre los grupos a excepción de los muestreos 9, 10 y 11, donde los tipos invernales (Grupo 2), registraron valores estadísticamente superiores al grupo 1 (primaverales). También se observó en forma general en la mayoría de los muestreos, los tipos invernales, aunque no fueron estadísticamente diferentes de los tipos primaverales-invernales, mostraron valores biológicamente superiores de GA, debido a que por su hábito de crecimiento, más tardío, mantuvieron por más tiempo una mayor proporción de hojas verdes en comparación con los invernales.

Cuadro 19. Resultados de la prueba de comparación de medias de GA entre grupos de triticales por muestreo.

GA											
Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	0.581 a	0.715 a	0.660 a	0.630 a	0.666 a	0.538 a	0.517 a	0.448 a	0.390 b	0.289 b	0.090 b
2	0.569 a	0.715 a	0.659 a	0.645 a	0.675 a	0.550 a	0.525 a	0.474 a	0.503 a	0.361 a	0.133 a
DMS α 0.05	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.3	0.03	0.03	0.01

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

GGA

En Cuadro 20 presenta los resultados de los análisis de varianza para esta variable, la cual considera exclusivamente los pixeles originados a partir de hojas verdes, sin considerar las hojas secas o senescentes, por lo cual es un parámetro más preciso en estimar el área fotosintéticamente activa de cada variedad. Se registraron diferencias estadísticas entre dosis de fertilización en todos los muestreos, excepto el décimo; entre repeticiones dentro de dosis de fertilización no se registraron diferencias significativas en ninguno de los muestreos. Entre los grupos de genotipos no se registraron diferencias estadísticas, a excepción del muestreo 8 que sólo fue significativo; no se registró significancia en la interacción DF*GRUPOS. Los coeficientes de variación variaron entre 10.0 y 66.7 %, dependiendo del muestreo.

Cuadro 20. Resultados de los análisis de varianza para GGA por muestreo.

GGA												
FV	GL	Cuadrados medios										
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
DF	1	0.4694 **	1.5919 **	3.0771 **	1.5903 **	0.5719 **	0.6541 **	0.7070**	0.2918 **	0.0760 **	0.0050 ns	0.0079 **
REP (DF)	4	0.0016 ns	0.0013 ns	0.0030 ns	0.0063 ns	0.0120 ns	0.0029 ns	0.008 ns	0.0010 ns	0.0014 ns	0.0007 ns	0.0000 ns
GRUPOS	1	0.0076 ns	0.0005 ns	0.0028 ns	0.0024 ns	0.0000 ns	0.0034 ns	0.0137 ns	0.0277 *	0.0508 **	0.0335 **	0.0146 **
DF*GRUPOS	1	0.0017 ns	0.0001 ns	0.0001 ns	0.0020 ns	0.0003 ns	0.0011 ns	0.0101 ns	0.0002 ns	0.0007 ns	0.0011 ns	0.0002 ns
ERROR	136	0.0031	0.0029	0.0051	0.0055	0.0074	0.0033	0.0051	0.0043	0.0049	0.0027	0.0007
TOTAL	143											
X GENERAL		0.414	0.538	0.525	0.493	0.434	0.340	0.355	0.251	0.208	0.123	0.039
CV %		13.6	10.0	13.6	15.0	19.8	16.9	20.0	26.2	33.8	42.6	66.7

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

El Cuadro 21 muestra los resultados y tendencias de la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización para esta variable. El experimento con fertilización nitrogenada registró en forma general valores significativamente mayores de GGA que el experimento sin fertilización, lo cual se explica por el efecto del nitrógeno en la producción de mayor área verde (follaje) de los genotipos, independientemente de su hábito de crecimiento.

Cuadro 21. Resultados de la prueba de comparación de medias de GGA entre dosis de fertilización por muestreo.

GGA											
DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	0.471 a	0.643 a	0.671 a	0.598 a	0.497 a	0.408 a	0.425 a	0.296 a	0.231 a	0.129 a	0.047 a
2	0.357 b	0.433 b	0.378 b	0.388 b	0.371 b	0.273 b	0.285 b	0.206 b	0.185 b	0.117 a	0.032 b
DMS α 0.05	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$)

Los resultados de las comparaciones de medias entre grupos de triticales para GGA (Cuadro 22), no reportaron diferencias significativas entre los grupos en la mayoría de los muestreos, sin embargo, en los muestreos 8, 9, 10 y 11, los materiales de hábito invernal mostraron superioridad con respecto a los de crecimiento rápido (primaverales).

Cuadro 22. Resultados de la prueba de comparación de medias de GGA entre grupos de triticales por muestreo.

GGA											
Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	0.421 a	0.540 a	0.529 a	0.489 a	0.434 a	0.335 a	0.346 a	0.237 b	0.189 b	0.107 b	0.029 b
2	0.407 a	0.536 a	0.520 a	0.497 a	0.434 a	0.345 a	0.365 a	0.265 a	0.227 a	0.138 a	0.049 a
DMS α 0.05	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$).

DISCUSIÓN

De manera general, los resultados de los análisis de varianza para todas las características evaluadas demostraron que la aplicación de nitrógeno es muy importante, ya que los valores promedio más altos en todas las variables se registraron cuando se aplicó fertilizante nitrogenado (DF1 vs DF2, Figuras 1-7), concordando lo antes mencionado con (Kichey *et al.*, 2007), que menciona que el nitrógeno (N), es el principal factor limitante en la producción agrícola y al igual que en otros cereales, es también uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo del triticale. En la Figura 1, se muestra el patrón de altura de planta (ALTURA) para cada grupo a través de los muestreos en cada dosis de fertilización. De manera general, se observa que en ambos grupos la fertilización nitrogenada estimuló el crecimiento de las plantas en forma significativa en comparación con las plantas sin fertilización, particularmente en los primeros muestreos en los tipos primaverales (Grupo 1). Sin embargo, los tipos invernales (grupo 2), registraron mayor altura de planta en la fase final de crecimiento del cultivo (muestreos 8-11). Con respecto a la fenología (ETAPA) de los grupos evaluados en este estudio, la Figura 2 muestra los patrones individuales de las etapas fenológicas de cada hábito de crecimiento, donde se observa que los tipos primaverales mostraron en general a través de los muestreos ser más precoces que los tipos invernales, siendo significativamente diferentes entre sí.

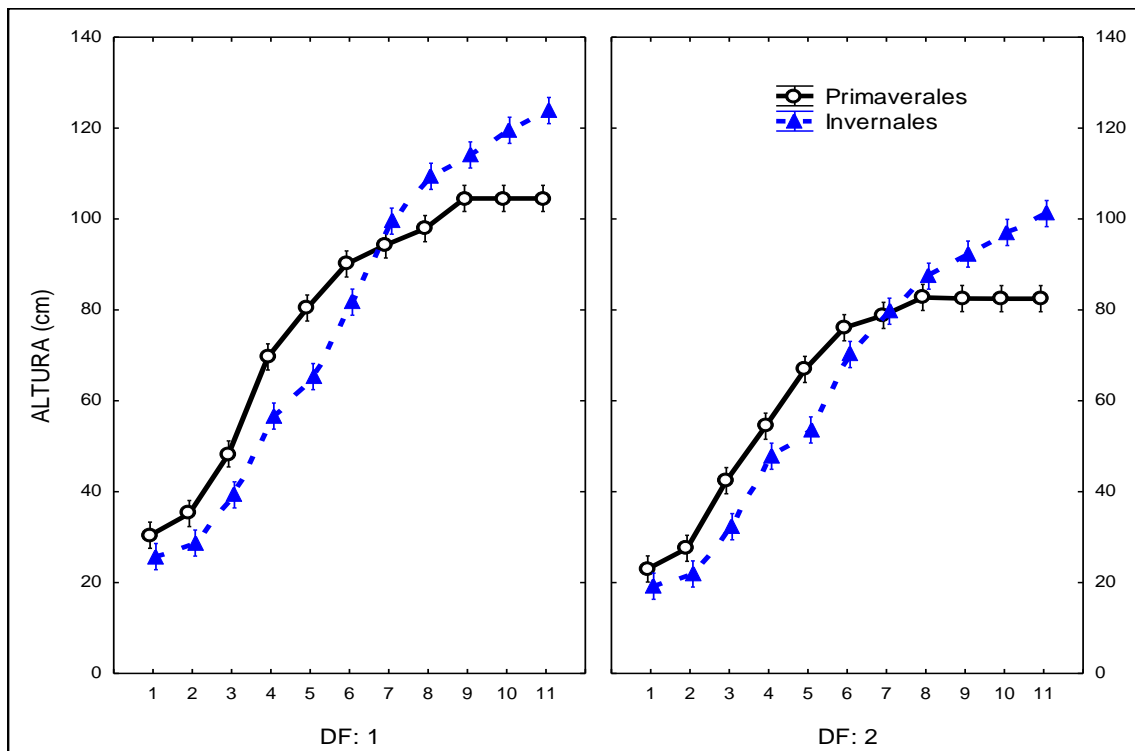


Figura 1. Patrones de altura de planta de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.

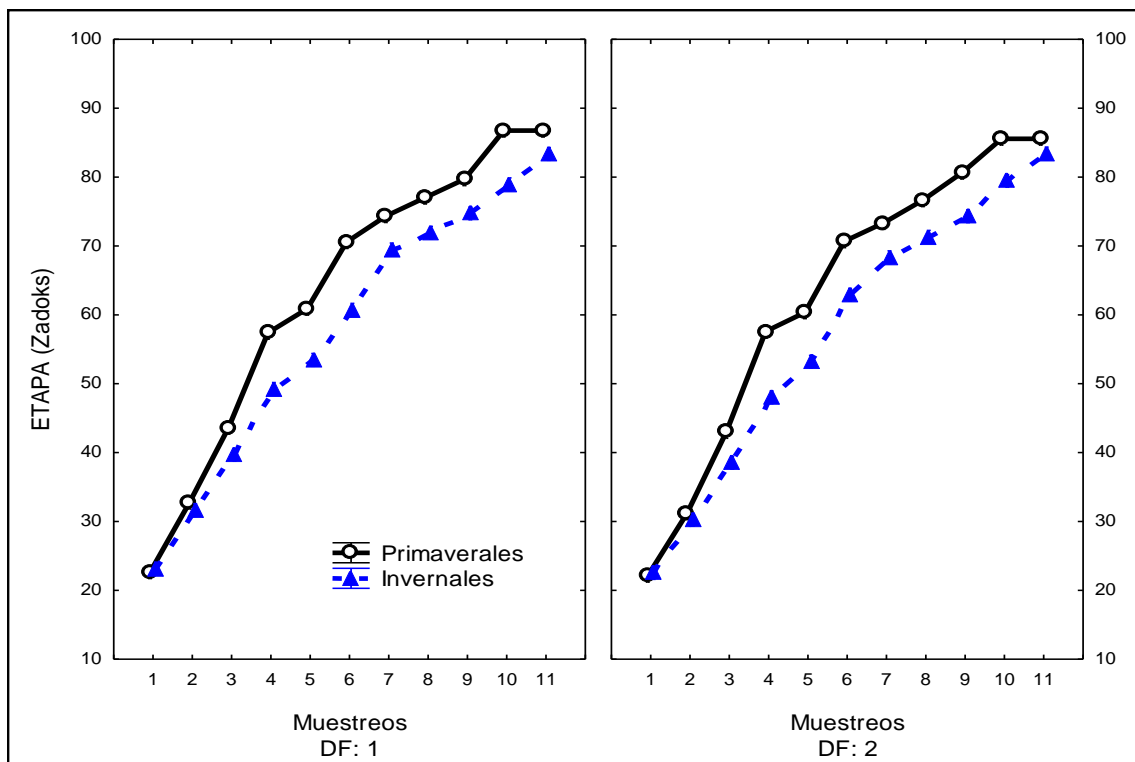


Figura 2. Patrones de etapa fenológica de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.

Con respecto a la acumulación de biomasa seca total (BIOTOT) a través de los muestreos (Figura 3), se observa que en ambos grupos de triticales la fertilización provocó una respuesta positiva y significativa. En el caso de los hábitos de crecimiento, los tipos primaverales (Grupo 1), acumularon de un 5.3 hasta un 10.3% más biomasa seca total en comparación con los invernales (G2), dependiendo del muestreo, lo que claramente demuestra la eficiencia en la aplicación de nitrógeno, debido a su tasa más alta de crecimiento.

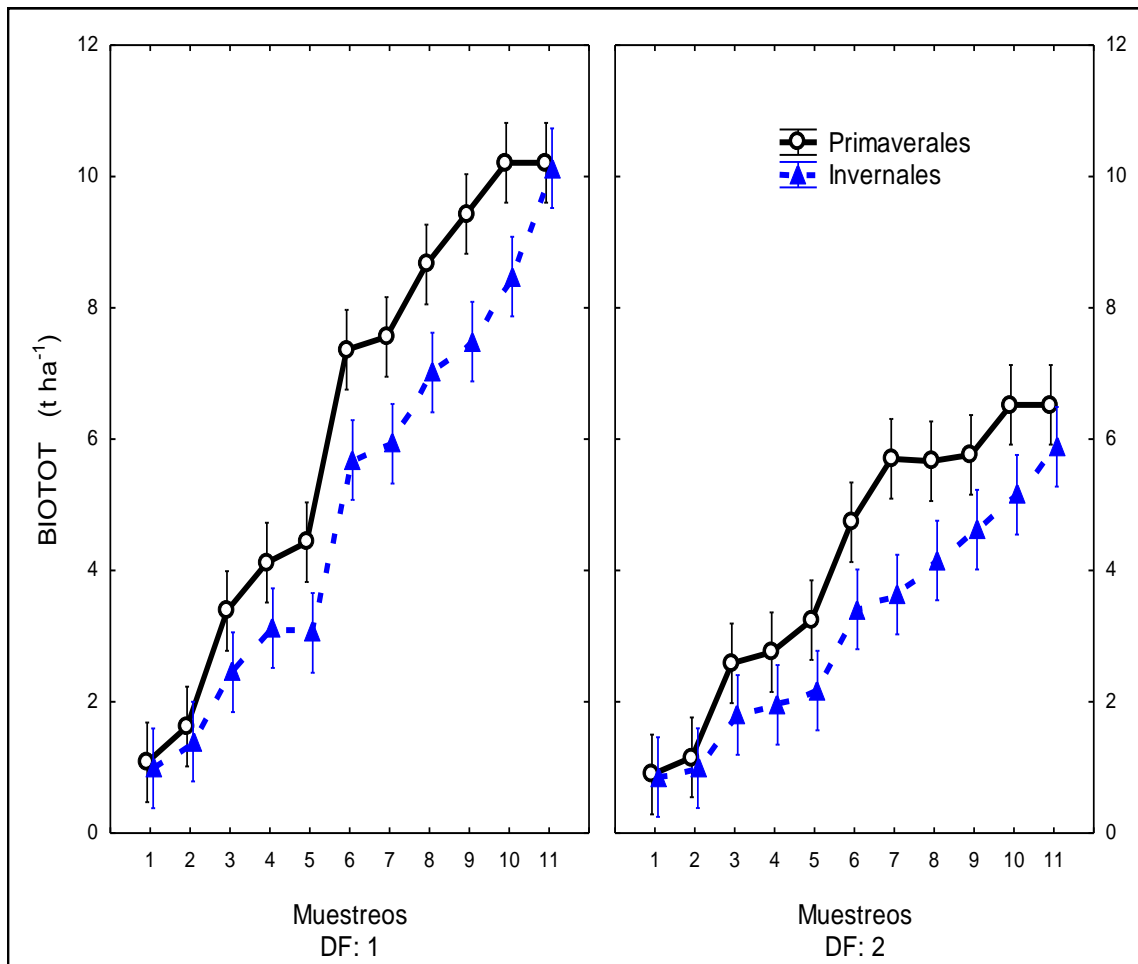


Figura 3. Patrones de acumulación de biomasa (BIOTOT) de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.

Con respecto a la acumulación de área foliar (AF) en las dosis de fertilización estudiadas a través de los muestreos (Figura 4), se observa que en ambos grupos de triticales la fertilización provocó una respuesta positiva y significativa. En el caso de los hábitos de crecimiento, en forma general, los tipos invernales (Grupo 2), acumularon significativamente de un 5.3 hasta un 10.3% más área foliar en comparación con los primaverales (G1), dependiendo del muestreo, lo que claramente demuestra la eficiencia en la aplicación de nitrógeno, debido a su tasa más alta de crecimiento.

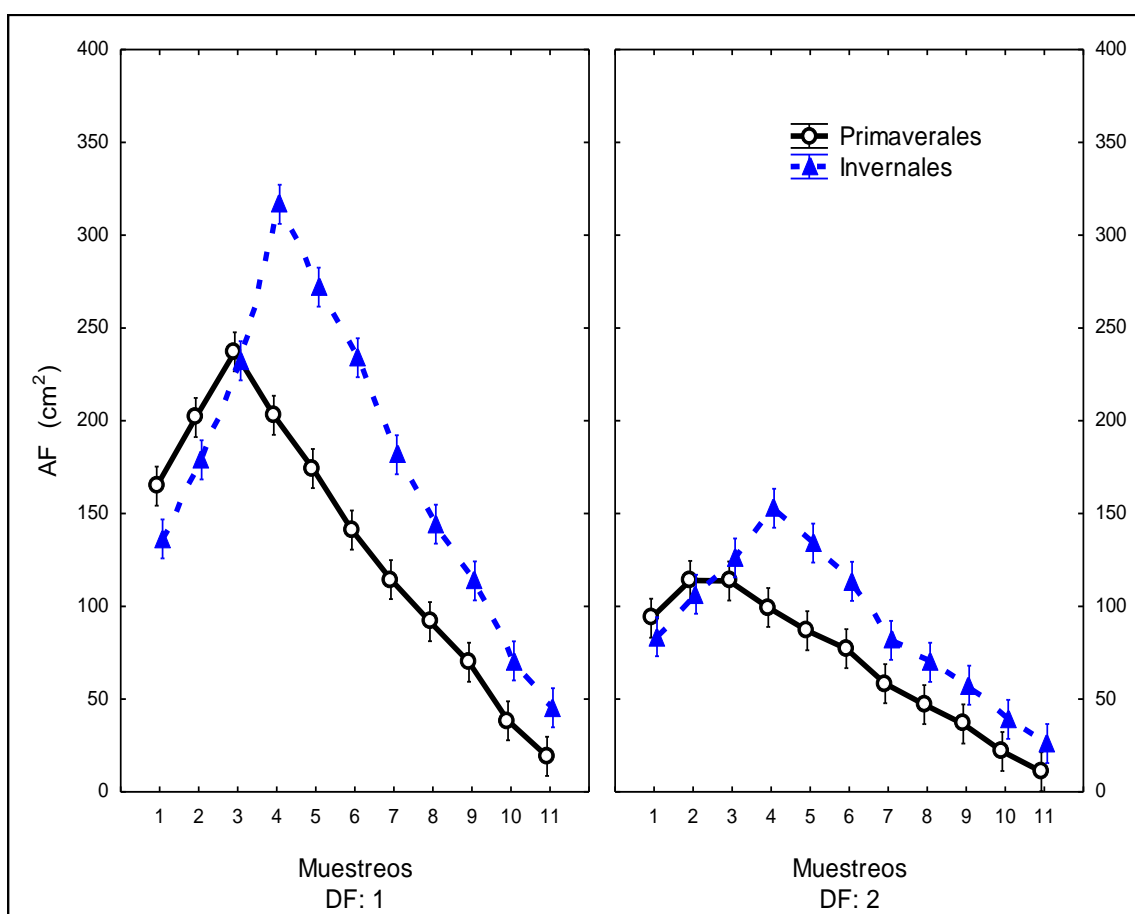


Figura 4. Patrón de acumulación de área foliar (AF) de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.

Para la variable NDVI, los grupos exhibieron una mayor área foliar con la aplicación de nitrógeno, lo cual se tradujo en mayores valores de NDVI (Figura 5). Ambos tipos de triticales exhibieron un patrón similar de valores de NDVI a través de los muestreos, sin embargo, los tipos primaverales (Grupo 1), mostraron valores mayores a los invernales (Grupo 2) en los primeros tres muestreos. La tendencia a partir del cuarto muestreo, particularmente en los tratamientos fertilizados, mostró que los tipos invernales mostraron significativamente mayores valores. Los resultados coinciden con lo reportado por Salas, (2003) que menciona que la disponibilidad de nitrógeno (N) para la planta es indispensable por ser un componente básico de todas las moléculas orgánicas involucradas en el crecimiento y desarrollo vegetal, particularmente del área foliar.

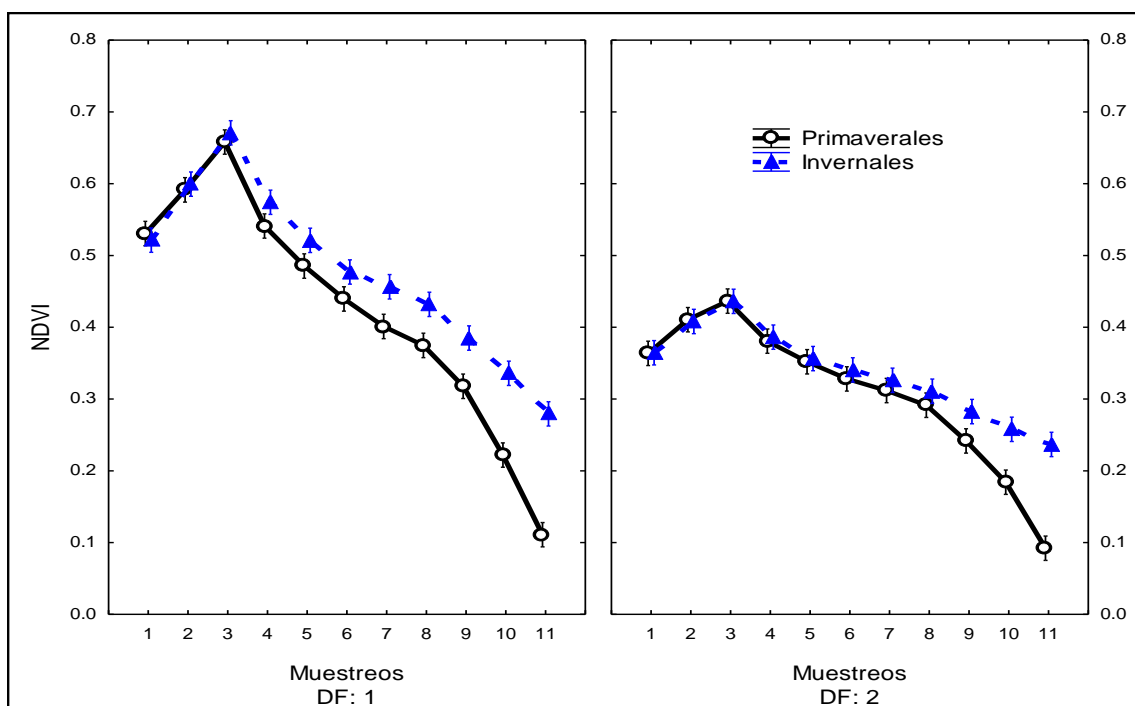


Figura 5. Lecturas de NDVI de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.

Con respecto a los índices de vegetación GA y GGA (área verde y área más verde), obtenidos a través de fotografías digitales, y que se fundamentan en la cantidad de píxeles verdes que son el resultado de una mayor área foliar, las Figuras 6 y 7 muestran las tendencias obtenidas para estos parámetros a través de todo el ciclo del cultivo, tanto en los tratamientos fertilizados como en los no fertilizados, observándose mayores valores de estos parámetros en los tratamientos con fertilización; por otra parte, no se registraron diferencias estadísticas entre los grupos de triticales evaluados para estas características..

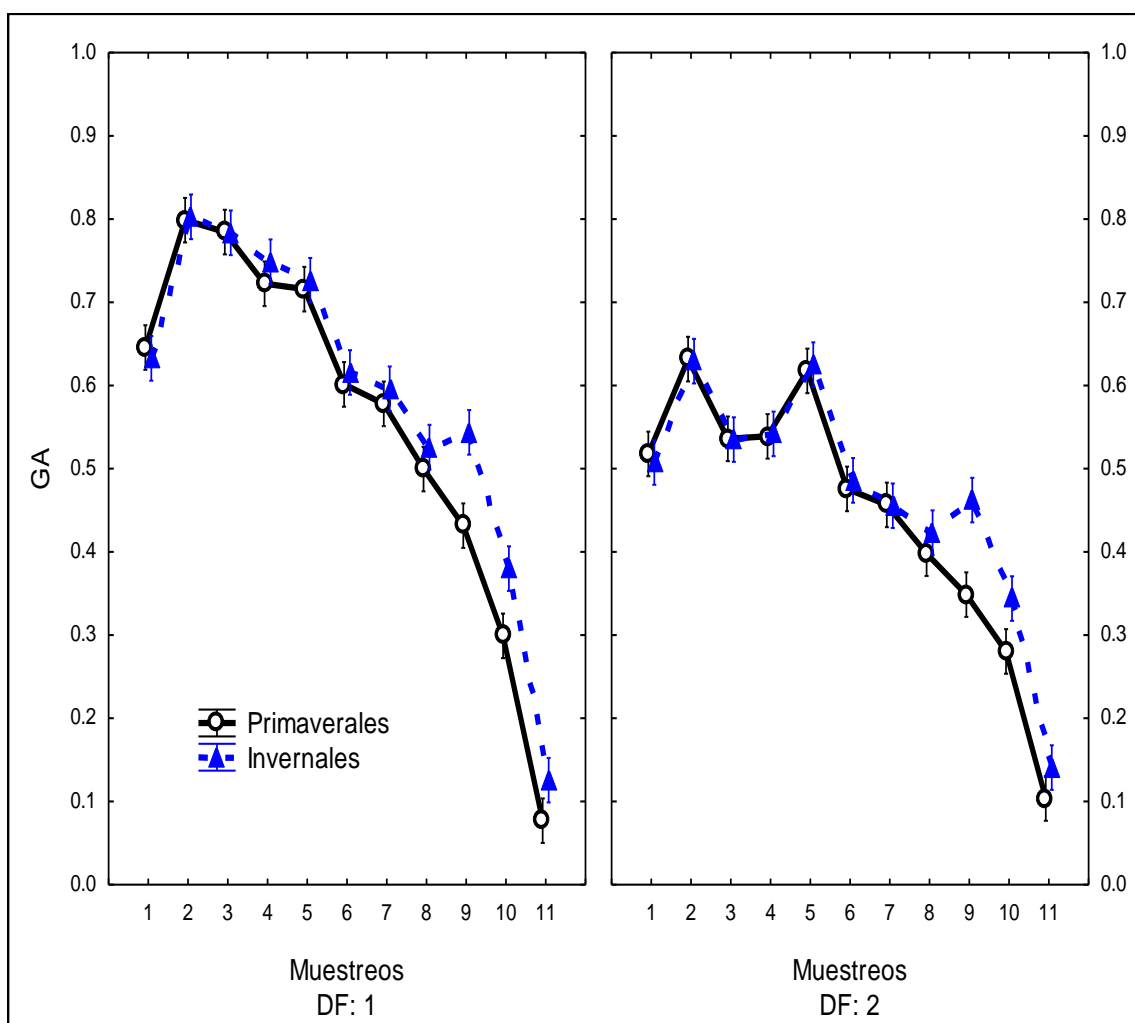


Figura 6. Lecturas de GA de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.

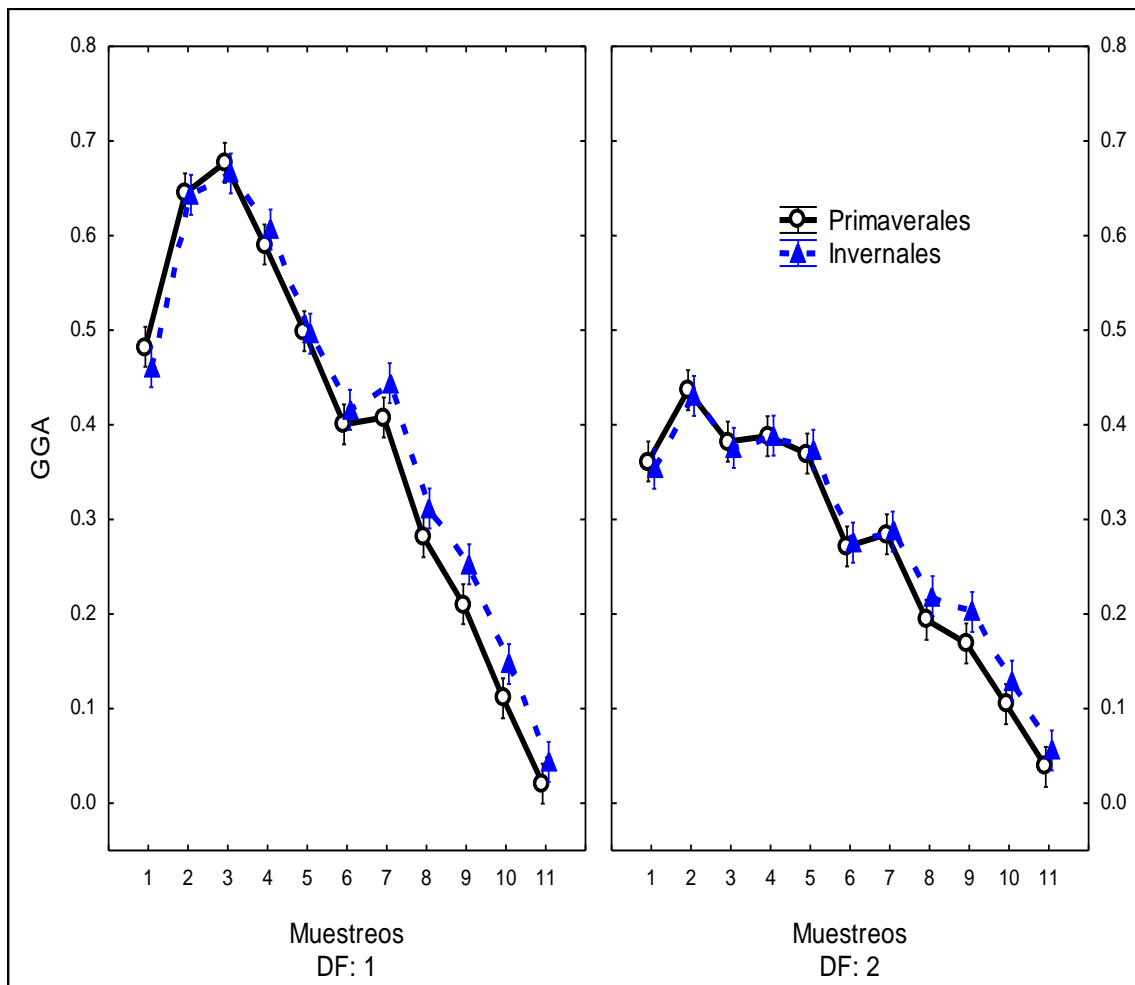


Figura 7. Lecturas de GGA de los dos tipos de triticales a través de los muestreos. Navidad 2015.

Con respecto a la utilidad del NDVI y los índices GA y GGA para estimar el área foliar (AF), aspecto muy importante en la selección de variedades para forraje, en este estudio se encontraron relaciones positivas y significativas entre NDVI y AF ($R^2=0.79$), NDVI y GA ($R^2=0.84$), NDVI y GGA ($R^2=0.89$) y AF y GA ($R^2=0.71$) y AF y GGA ($R^2=0.76$), por lo que pueden utilizarse como herramientas predictivas confiables para la estimación no destructiva de la biomasa foliar (follaje) en programas de mejoramiento de cereales forrajeros, en este caso, triticale (Figuras 8-12).

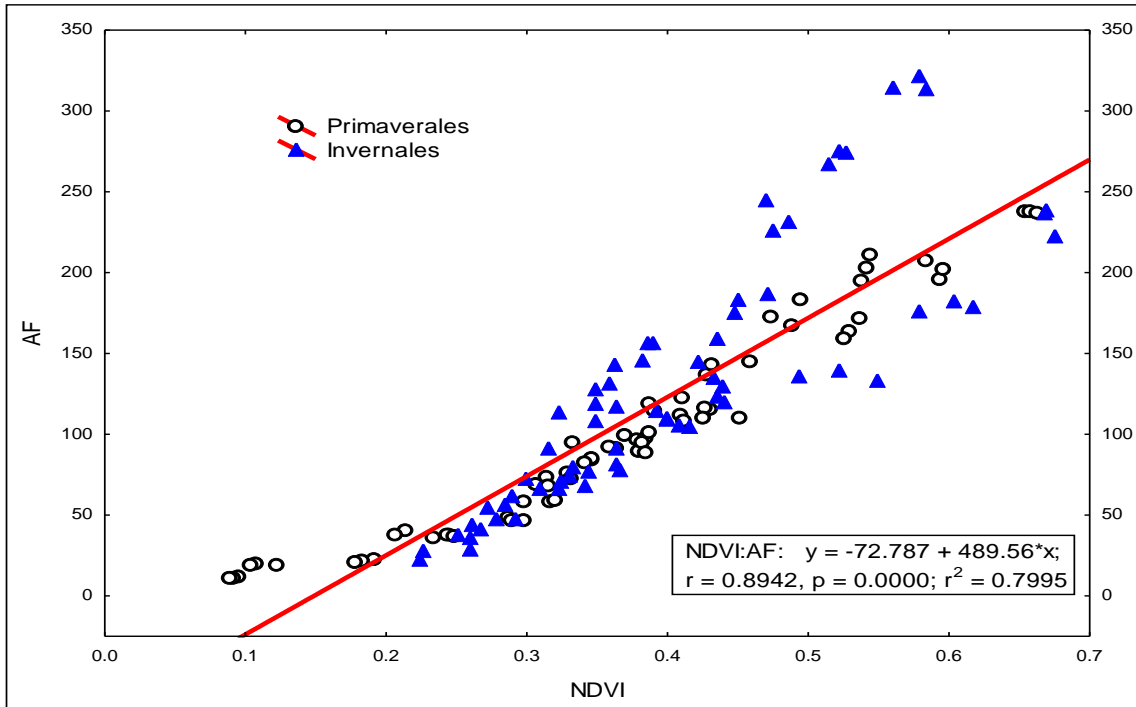


Figura 8. Relación entre lecturas de NDVI y área foliar (AF). Navidad 2015.

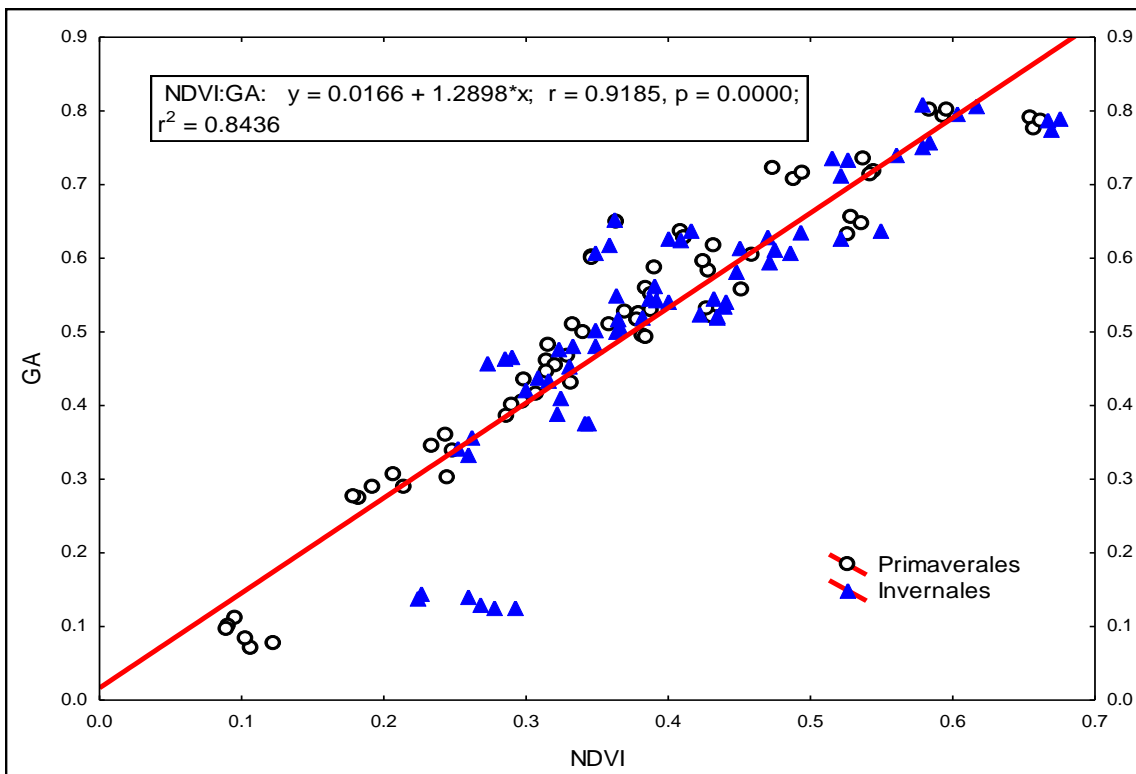


Figura 9. Relación entre lecturas de NDVI y GA. Navidad 2015.

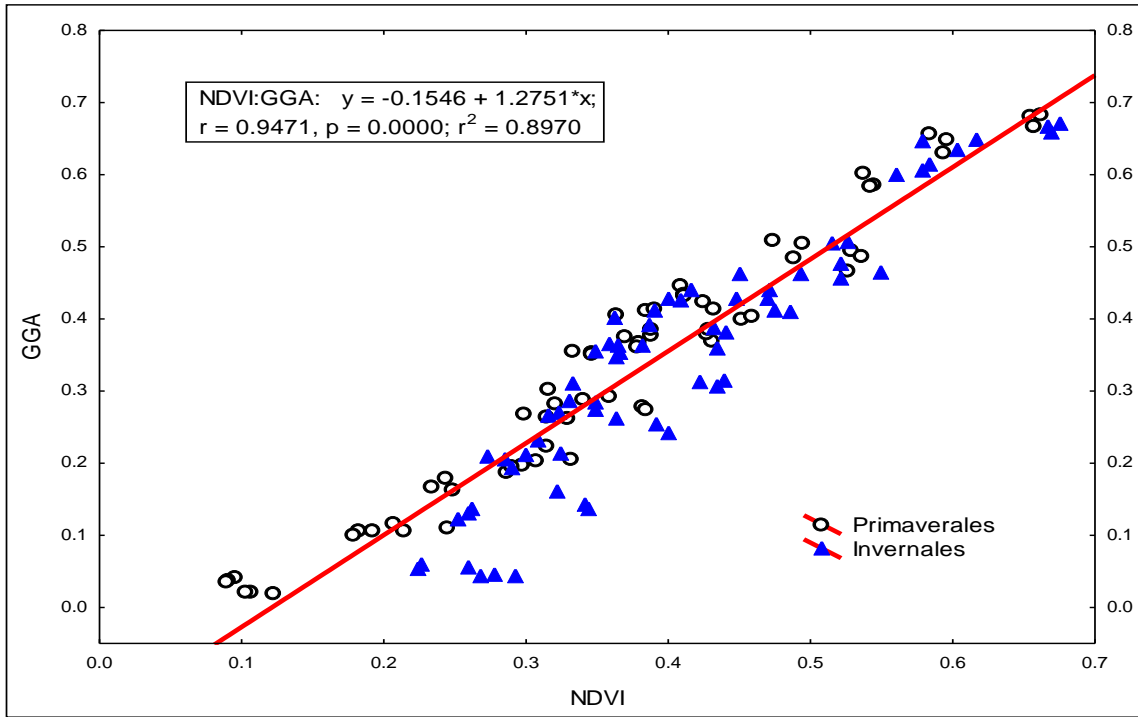


Figura 10. Relación entre lecturas de NDVI y GGA. Navidad 2015.

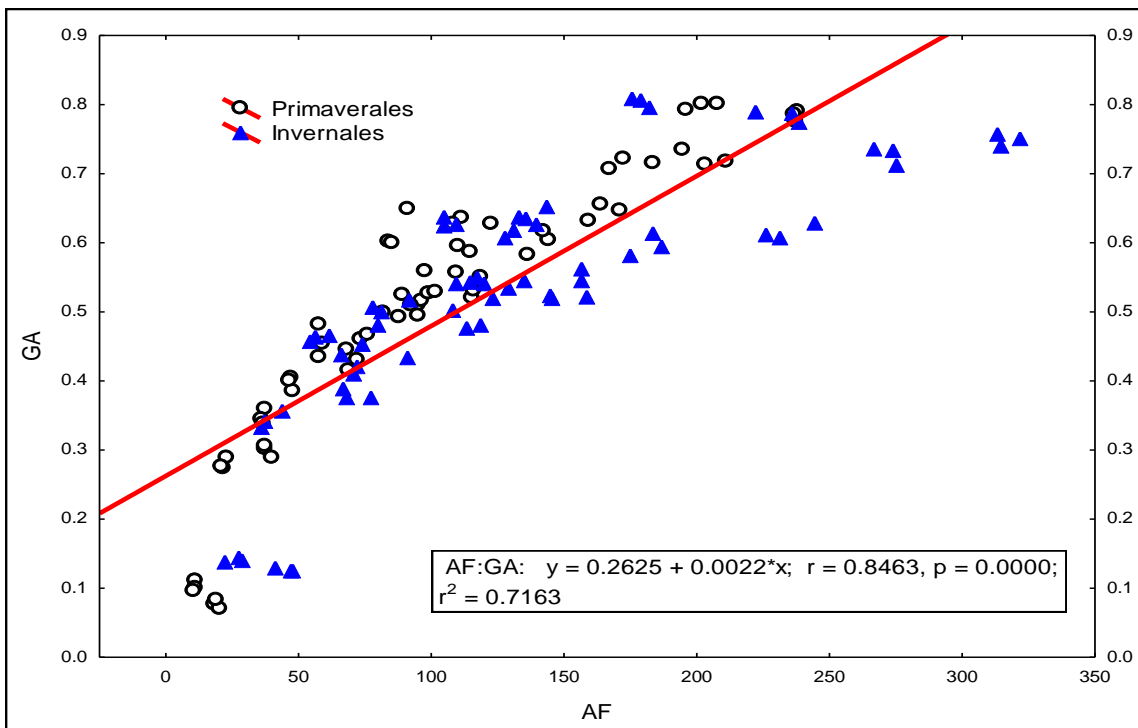


Figura 11. Relación entre área foliar (AF) y GA. Navidad 2015.

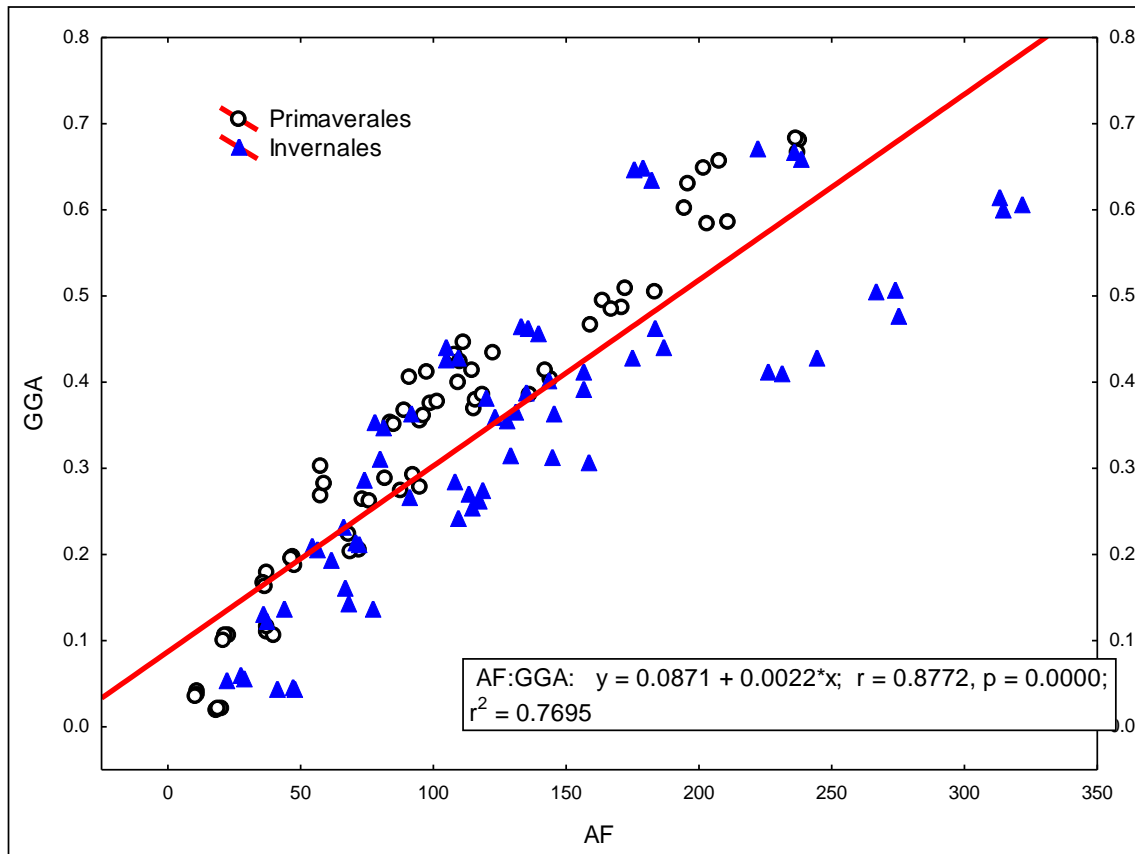


Figura 12. Relación entre área foliar (AF) y GGA. Navidad 2015.

Por otra parte, cuando se estudió la relación entre el NDVI y los índices GA y GGA con la biomasa total (BIOTOT) de los genotipos evaluados, se encontró que cuando se realizaron las correlaciones entre estos parámetros incluyendo todo el ciclo (11 muestreos) y durante la fase reproductiva de los genotipos (muestreos 5-11), las relaciones fueron negativas (Cuadro 23), por lo que en base a esta investigación no son de utilidad práctica para estimar la biomasa total durante las fases mencionadas; sin embargo, cuando se realizaron las correlaciones incluyendo sólo los muestreos durante la fase vegetativa (Muestreos 1-4), el NDVI, GA y GGA se relacionaron positivamente con la biomasa (BIOTOT), por lo que se puede estimar en forma confiable la producción de forraje o biomasa durante la

fase antes mencionada sin realizar muestreos destructivos, particularmente con el área foliar (AF) y el índice de vegetación GGA, (Cuadro 23).

Cuadro 23. Coeficientes de correlación entre los parámetros e índices de vegetación utilizados en este estudio y la biomasa total (BIOTOT). Navidad 2015.

Correlaciones significativas ($p < 0.05$) incluyendo todo el ciclo (11 muestreos)				
	AF	NDVI	GA	GGA
BIOTOT	-0.43 *	-0.53 *	-0.62 *	-0.64 *
Correlaciones significativas ($p < 0.05$) incluyendo sólo la fase reproductiva (M5-M11)				
BIOTOT	-0.36 ns	-0.31 ns	-0.51 *	-0.49 *
Correlaciones significativas ($p < 0.05$) incluyendo sólo la fase vegetativa (M1-M4)				
BIOTOT	0.58 *	0.41 *	0.35 *	0.45 *

Los resultados anteriores concuerdan con lo reportado por Casadesús y Villegas (2014), con trigo, triticale y *Triticum aestivum*, los cuales encontraron que antes de la antesis o floración (fase vegetativa), la biomasa seca total estuvo positivamente correlacionada con el AF, GA y GGA. Por otra parte, reportaron que la relación entre estos índices y la biomasa seca total fue negativa después de la antesis (etapa reproductiva), debido a que los índices disminuyeron como consecuencia de la senescencia de las hojas mientras que la cantidad de biomasa se mantuvo o inclusive fue mayor al final del ciclo. Los resultados anteriores confirman a los parámetros NDVI, AF, GA y GGA en este estudio como una herramienta eficaz en la selección indirecta de biomasa, principalmente foliar, de germoplasma de triticale, particularmente cuando el objetivo principal es la

explotación en etapa vegetativa del cultivo, por ejemplo, pastoreo directo, verdeo y henificado en etapa máxima de embuche.

CONCLUSIONES

De acuerdo a las condiciones bajo las cuales se realizó la presente investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- La aplicación de fertilizante nitrogenado promovió un incremento significativo de los valores en todas las características estudiadas, en comparación con los tratamientos no fertilizados.
- Los genotipos de hábito primaveral registraron significativamente mayores valores de biomasa seca total (BIOTOT) que los genotipos de hábito invernal, además de ser más precoces, lo cual es ventajoso bajo algunos tipos de explotación comercial, por ejemplo, para producción de heno en un solo corte.
- Los tipos invernales produjeron significativamente mayor área foliar que los primaverales, por lo que son más adecuados para producir forraje de más alta calidad, en virtud de su mayor proporción de hojas.
- Los índices de vegetación NDVI, GA y GGA pueden ser una herramienta eficaz en la selección de materiales de triticale con mayor área foliar en virtud de su alta correlación, y en menor grado en la selección de materiales con alta biomasa total.
- El NDVI, AF, GA y GGA mostraron una mayor relación positiva con la producción de biomasa, tanto foliar como total, cuando las mediciones fueron realizadas durante la fase vegetativa de los genotipos, e independientemente de su hábito de crecimiento.

LITERATURA CITADA

- Adamsen, F.J., Pinter, P.J., Barnes, E.M., LaMorte, R.L., Wall, G.W., Leavitt, S.W., Kimball, B.A. 1999. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Sci.* 39: 719–724.
- Amir, J., Sinclair TR. 1991. A model of temperature and solar radiation effects on spring wheat growth and yield. *Field Crop Res.* 28:47-58.
- Aparicio, N., Villegas, D., Araus, J.L., Casadesús, J., Royo, C. 2002. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Sci.* 42: 1547–1555.
- Austin, R.B., Bingham, J., Blackwell, R.D., Evans, L.T., Ford, M.A., Morgan, C.L. and Taylor, M. 1980. Genetic improvements in winter wheat yield since 1890 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci.* 94:675-689.
- Ayala-Silva, T and Beyl, C.A. 2005. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. *Advances in Space Research.* 35:305-317.
- Baker, B., Olszyk, D.M., Tingey, D. 1996. Digital image analysis to estimate leaf area. *J. Plant Physiol.* 148: 530–535.
- Calvao T., Palmeirim J.M. 2004. Mapping Mediterranean scrub with satellite imagery: biomass estimation and spectral behaviour. *International Journal of Remote Sensing.* 25: 3113–3126.
- Campillo, R. R., Jobet, F. C. y Undurraga, D. P. 2007. Optimización de la fertilización nitrogenada para trigo de alto potencial de rendimiento en andisoles de la región de la Araucanía, Chile. *Chile. Agric. Téc.* 67(3):281-291.
- Campillo, C., Prieto, M.H., Daza, C., Monino, M.J., Garcia, M.I. 2008. Using digital images to characterize canopy coverage and light interception in a processing tomato crop. *Hortscience.* 43: 1780– 1786.

- Casadesús, J., Kaya, Y., Bort, J., Nachit, M.M., Araus, J.L., Amor, S., Ferrazzano, G., Maalouf, F., Maccaferri, M., Martos, V., Ouabbou, H., Villegas, D. 2007. Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. *Ann. Appl. Biol.* 150: 227–236.
- Casadesús, J., and Villegas, D. 2014. Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. *Journal of Integrative Plant Biology.* 56 (1): 7-14.
- CIMMYT. 1976. Trigo x Centeno = Triticale. *El CIMMYT hoy*, México, D.F.
- Collar, C., and Aksland, G. 2001. Harvest effects on yield and quality of winter forage. *Proc. 31st California Alfalfa and Forage Symposium*. Ca. U.C. Cooperative Extensión. University of California, Davis. Calif: 133-142.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., Strachan, I.B. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* 90: 337–352.
- Hay, RKM, Kirby, EJM, 1991. Convergence and synchrony - a review of the coordination of development in wheat. *Austr. J. Agric. Res.* 42:661-700.
- Ide, R., Oguma, H. 2010. Use of digital cameras for phenological observations. *Ecol. Info.* 5: 339–347.
- Kalen, D.L. and Camp, C.R. 1982. N, P and K accumulation by high-yielding irrigated maize grown on a typical Paleudult in the Southeastern U.S. Ed. *Proc. 9th Intl, Plant Nutr. Colloq.* Vol. 1. Warwick University, UK. Pp. 262-267.
- Kichey, T.; Hirel, B.; Heumez, E.; Dubois, F. and Le Gouis, J. 2007. In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Res.* 102:22-32.

- Kirby, EJM, Appleyard M, Fellowes G. 1985. Effect of sowing and variety on main shoot leaf emergence and number of leaves in barley and wheat. *Agronomie* 5:117-26.
- Kirby, EJM. 1990. Co-ordination of leaf emergence and leaf and spikelet primordium initiation in wheat. *Field Crops Res.* 25:253-264.
- Lati, R.N., Filin, S., Eizenberg, H. 2011. Robust methods for measurement of leaf-cover area and biomass from image data. *Weed Sci.* 59: 276– 284.
- Li, X.B., Chen, Y.H., Yang, H., Zhang, Y.X. 2005. Improvement, comparison, and application of field measurement methods for grassland vegetation fractional coverage. *J. Int. Plant Biol.* 47: 1074– 1083.
- Liu, Z.Y., Huang, J.F., Wu, X.H., Dong, Y.P. 2007. Comparison of vegetation indices and red-edge parameters for estimating grassland cover from canopy reflectance data. *J. Int. Plant Biol.* 49: 299– 306.
- Longnecker, N., Kirby, EJM., Robson, A. 1993. Leaf emergence, tiller growth, and apical development of nitrogen-deficient spring wheat. *Crop Sci.* 33:154-60.
- Lozano del Río, A, J. 2002. Triticales forrajeros para la Región Lagunera. *Revista Agropecuaria Laguna.* 29 (6):4-5.
- Lozano-del Río, A. J., Zamora-Villa, V. M., Ibarra-Jiménez, L., Rodríguez-Herrera. S. A., de la Cruz-Lázaro, E., y de la Rosa-Ibarra, M. 2009. Análisis de la interacción genotipo-ambiente mediante el modelo AMMI y potencial de producción de triticales forrajeros (*X Triticosecale* Wittmack.). *Universidad y Ciencia.* 25(31):81-92.
- Lukina, E.V., Stone, M.L., Rann, W.R. 1999. Estimating vegetation coverage in wheat using digital images. *J. Plant Nutr.* 22: 341–350.
- Maas, EV., Grieve, CM. 1990. Spike and leaf development in salt stressed wheat. *Crop Sci.* 30:1309-1313.

- Malhi, S.S., Johnston, A.M., Schoenau, J.J., Wang, Z.H., and Vera, C.L. 2006. Seasonal biomass accumulation and nutrient uptake of wheat, barley and oat on a Black Chernozem soil in Saskatchewan. *Can. J. Plant Sci.* 86:1005-1014.
- McMaster, G.S., Wilhelm, W., Palic, D.B., Porter, J.R., Jamieson, P.D. 2003. Spring wheat leaf appearance and temperature: extending the paradigm? *Ann. Bot.* 91:697-705.
- Miglietta, F. 1989. Effect of photoperiod and temperature on leaf initiation rates in wheat (*Triticum* spp.). *Field Crops Res.* 21:121-130.
- Miglietta, F. 1991a. Simulation of wheat ontogenesis. I. Appearance of main stem leaves in the field. *Clim. Res.* 1:145-150.
- Miglietta, F. 1991b. Simulation of wheat ontogenesis. III. Effect of variety, nitrogen fertilisation and water stress on leaf appearance and final leaf number in the field. *Clim. Res.* 1:233-242.
- Moore, E. L. 2005. Alternative forage crops when irrigation water is limited. *Drought Management Factsheet*. British Columbia, Canada. 6:1-6.
- Moreno, A., Moreno, M. M., Ribas, F., and Cabello, M. J. 2003. Influence of nitrogen fertilizer on grain yield of barley (*Hordeum vulgare* L.) under irrigated conditions. *Spanish J. Agric. Res.* 1:91-100.
- Mullan, D.J., Reynolds, M.P. 2010. Quantifying genetic effects of ground cover on soil water evaporation using digital imaging. *Funct. Plant Biol.* 37: 703–712.
- National Research Council. 1989. *Triticale: A promising addition to the world's cereal grains*. National Academy Press, Washington, D.C. 105 pp.
- Neal, J.S., Fulkerson, W.J., and Campbell, L.C. 2010. Differences in yield among annual forages used by the dairy industry under optimal and deficit irrigation. *Crop and Pasture Sci.* 61:625-638.

- Newbould, P. 1989. The use of nitrogen fertilizer in agriculture. Where do we go practically an ecologically? Ecology of arable land (Eds.). Clarholm, M. and Bergström, L. Kluwer, Dordrecht. 281-295 pp.
- Ozkan, H., Genv, T., Yagnasanlar, T., and Toklu, F. 1999. Stress tolerance in hexaploid spring triticales under Mediterranean environment. Plant Breeding. 118:365-367.
- Parodi, P. 2003. Mayor eficiencia en el uso del nitrógeno puede aumentar la rentabilidad del trigo y hacerlo más amigable hacia el ambiente. *In*: Kohli, M. M.; Díaz, M. y Castro, M. (Eds.). *In*: Seminario Internacional Estrategias y Metodologías Utilizadas en el Mejoramiento de Trigo, La Estanzuela, Uruguay. 8-11 de octubre de 2001. CIMMYT-INIA, Colonia, Uruguay. 275-283 pp.
- Poysa, V.W. 1985. Effect of forage harvest on grain yield and agronomic performance of winter triticales, wheat and rye. Can. J. Plant Sci. 65:879-888.
- Prasad, B., Carver, B.F., Stone, M.L., Babar, M.A., Raun, W.R., Klatt, A.R. 2007. Potential use of spectral reflectance indices as a selection tool for grain yield in winter wheat under great plains conditions. Crop Sci 47: 1426–1440.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proc Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symp, December 10–15 1974, Greenbelt, MD, 3:301–317, NASA, Washington, D.C.
- Royo, C. and Parés, D. 1995. Yield and quality of winter and spring triticales for forage and grain. Grass and Forage Science. 51:449-455.
- Royo, C., Aparicio, N., Villegas, D., Casadesús, J., Monneveux, P., Araus, J.L. 2003. Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. Int. J. Remote Sens. 24: 4403–4419.
- Royo, C., Aparicio, N., Blanco, R., Villegas, D. 2004. Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under Mediterranean conditions. Eur. J. Agron. 20: 419–430.

- Salas, C. 2003. Nutrición mineral de plantas y el uso de fertilizantes. *In*: Meléndez, G. y Molina, E. (Eds.). Fertilizantes: características y manejo. Centro de Investigaciones Agronómicas, UCR, San José. 1-19 pp.
- SAS Institute Inc. 1999. User's Guide. Statistics, Version 8.1. Sixth edition. SAS Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Shpiler, L., and Blum, A. 1986. Differential reaction of wheat *Triticum aestivum* cultivars to hot environments. *Euphytica* 35:483-492.
- Statistica. 2001. By Statsoft Inc. U.S. A. Versión 6.1.
- Villegas, D., Aparicio, N., Blanco, R., Royo, C. 2001. Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat grown under Mediterranean conditions. *Ann. Bot.* 88: 617–627.
- Wallace J.F., Caccetta, P.A., Kiiveri H.T. 2004. Recent developments in analysis of spatial and temporal data for landscape qualities and monitoring. *Australian Ecology.* 29: 100– 107.
- Ye, C.W., Díaz, S.H., Lozano-del Río, A.J., Zamora-Villa, V.M., Ayala, O.M. 2001. Agrupamiento de germoplasma de triticale por rendimiento, ahijamiento y gustosidad. *Téc. Pecu.* 39 (1):15-29.
- Zadoks JC, Chang TT, Konzak CF. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.

RESUMEN

En el Norte y Centro de México existe una alta demanda de forraje de calidad que con mejoras tecnológicas en el riego y la fertilización y variedades más productivas pueden hacer más eficientes los diferentes sistemas de producción. Los objetivos de este trabajo fueron documentar las características de biomasa total, área foliar y NDVI de genotipos de hábito de crecimiento primaveral e invernal a través de 11 muestreos sucesivos bajo dos diferentes dosis de fertilización nitrogenada, y documentar la relación entre el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), GA y GGA y la producción de biomasa y área foliar. La investigación se realizó en el Campo Agrícola Experimental de la UAAAN en Navidad, N.L. durante el ciclo otoño-invierno 2014-2015. El diseño experimental fue bloques completos al azar. La aplicación de nitrógeno promovió valores mayores en todas las variables estudiadas en comparación con los tratamientos no fertilizados. Los genotipos de hábito primaveral registraron mayores valores de biomasa total que los genotipos de hábito invernal, y estos a su vez registraron significativamente mayor área foliar. Los resultados de esta investigación confirman a los parámetros NDVI, AF, GA y GGA como una herramienta eficaz en la selección indirecta de biomasa, principalmente foliar, de germoplasma de triticale, particularmente cuando el objetivo principal es la explotación en etapa vegetativa del cultivo, por ejemplo, pastoreo directo, verdeo y henificado en etapa máxima de embuche.

Palabras claves: triticale, biomasa, dosis de fertilización, NDVI, AF, GA, GGA.