



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

**DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE DILUCIÓN DE
NITRÓGENO EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA
DE AVENA FORRAJERA (*Avena sativa* L.)**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO FITOTECNISTA
PRESENTAN:

HECTOR DANIEL JIMENEZ CUEVAS

FRANCISCO JAVIER GARDUÑO GRANADOS

MODALIDAD DE TESIS: COLECTIVA

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. CARLOS GUSTAVO MARTÍNEZ RUEDA

ASESOR:

Dr GASPAR ESTRADA CAMPUZANO

EL CERRILLO PIEDRAS BLANCAS, TOLUCA,
ESTADO DE MEXICO, ENERO DEL 2021

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| RESUMEN | viii |
| ABSTRACT..... | ix |
| I INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II REVISIÓN DE LITERATURA | 3 |
| 2.1. Origen, importancia y distribución de la avena forrajera | 3 |
| 2.1.1. Origen..... | 3 |
| 2.1.2. Importancia y distribución | 3 |
| 2.2. Prácticas de manejo | 6 |
| 2.2.1. Características y requerimientos del cultivo..... | 6 |
| 2.2.2 Preparación del terreno | 7 |
| 2.2.3. Época de siembra | 8 |
| 2.2.4. Método y densidad de siembra | 8 |
| 2.2.5. Fertilización..... | 9 |
| 2.2.6. Control de maleza | 9 |
| 2.2.7. Manejo de plagas | 10 |
| 2.2.8. Enfermedades | 11 |
| 2.2.9. Cosecha | 11 |
| 2.2.10. Pastoreo | 12 |
| 2.3. Variedades elegidas | 12 |
| 2.3.1. Karma | 12 |
| 2.3.2. Obsidiana | 12 |
| 2.3.3. Avemex..... | 13 |
| 2.4. Etapas de desarrollo | 13 |
| 2.5. Papel del nitrógeno en el crecimiento y en la productividad de la avena forrajera... 16 | |
| 2.6. Análisis del crecimiento en cultivos extensivos | 18 |
| 2.6.1 Tasa de crecimiento del cultivo | 18 |
| 2.6.2 Tasa de crecimiento relativo (TCR) | 19 |
| 2.6.3. Índice de área foliar (IAF)..... | 20 |
| 2.6.4. Tasa de asimilación neta (TAN)..... | 20 |
| 2.6.5 Duración de área foliar (DAF)..... | 21 |
| 2.7. Curva de dilución del nitrógeno..... | 21 |
| 2.8. Otros Indicadores de estatus nutricional..... | 22 |
| III MATERIALES Y MÉTODOS | 25 |
| 3.1. Ubicación del trabajo experimental..... | 25 |

| | |
|---|----|
| 3.2.- Factores de estudio y diseño experimental..... | 27 |
| 3.3. Manejo agronómico del experimento | 27 |
| 3.4. Variables de estudio..... | 28 |
| 3.4.1. Acumulación de materia seca | 28 |
| 3.4.2. Área foliar..... | 28 |
| 3.4.3. Análisis de crecimiento | 28 |
| 3.4.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) | 29 |
| 3.4.5. Contenido de clorofila (SPAD)..... | 29 |
| 3.4.6. Contenido de nitrógeno | 29 |
| 3.4.7. Contenido de fibra | 29 |
| 3.4.8. Contenido de proteína | 30 |
| 3.4.9 Determinación de la curva de dilución de nitrógeno | 30 |
| 3.5.- Análisis estadístico..... | 30 |
| 3.5.1. Análisis de varianza | 30 |
| 3.5.2 Comparación de medias | 31 |
| 3.5.3 Análisis de regresión | 32 |
| IV RESULTADOS..... | 33 |
| 4.1. Rendimiento de forraje, producción de materia seca, índice de área foliar y contenido de nitrógeno | 33 |
| 4.1.1 Efecto de la etapa de corte | 34 |
| 4.1.2 Respuesta de las variedades | 34 |
| 4.1.3. Efecto de la dosis de nitrógeno..... | 35 |
| 4.2. Análisis de crecimiento | 36 |
| 4.2.1 Efecto de la dosis de nitrógeno..... | 36 |
| 4.2.2 Respuesta de las variedades de avena a la dosis de N | 37 |
| 4.3. Cambios en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) durante el ciclo de crecimiento | 38 |
| 4.3.1 Efecto de las variedades de avena sobre el índice de vegetación de diferencia normalizada a través del ciclo de crecimiento..... | 39 |
| 4.3.2. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre el índice de vegetación de diferencia normalizada a través del ciclo de crecimiento..... | 40 |
| 4.3.3. Superficie de respuesta del índice de vegetación de diferencia normalizada para cada una de las variedades | 41 |
| 4.4 Cambios en el contenido de clorofila foliar durante las etapas de crecimiento | 42 |
| 4.4.1 Contenido de clorofila foliar en cada una de las etapas de crecimiento en las tres variedades de avena | 44 |
| 4.4.2 Efecto del nitrógeno sobre el contenido de clorofila foliar | 45 |

| | |
|---|----|
| 4.4 Curva de dilución de nitrógeno e índice de nutrición de nitrógeno | 45 |
| V DISCUSIÓN | 52 |
| VI CONCLUSIONES..... | 58 |
| VII BIBLIOGRAFÍA CITADA | 61 |

LISTA DE CUADROS

| Número | Título del Cuadro | Página |
|--------|---|--------|
| 1 | Principales estados productores de avena forrajera (SIAP, 2017). | 7 |
| 2 | Análisis de suelo lote experimental. Laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la U.A.E.M., 2018. | 27 |
| 3 | Condiciones climáticas ocurridas durante la conducción del trabajo experimental | 28 |
| 4 | Valores de F de los análisis de varianza y su significancia estadística para el rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS), índice de área foliar (IAF), contenido de nitrógeno (CN) y nitrógeno extraído (NE). | 35 |
| 5 | Efecto de la etapa de corte (valores medios) sobre rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS), índice de área foliar (IAF), contenido de nitrógeno (CN) y nitrógeno extraído (NE). | 36 |
| 6 | Efecto de la variedad (valores medios) sobre rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS), índice de área foliar (IAF), contenido de nitrógeno (CN) y nitrógeno extraído (NE). | 36 |
| 7 | Efecto de la dosis de nitrógeno (valores medios) sobre rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS), índice de área foliar (IAF), contenido de nitrógeno (CN) y nitrógeno extraído (NE). | 37 |
| 8 | Valores de F de los análisis de varianza y su significancia estadística para los valores de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) registrados durante el ciclo de crecimiento. | 41 |
| 9 | Valores medios del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en tres variedades de avena forrajera durante el ciclo de crecimiento | 42 |
| 10 | Efecto de la dosis de nitrógeno (valores medios) sobre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) durante el ciclo de crecimiento en avena forrajera | 43 |
| 11 | Valores de F de los análisis de varianza y su significancia estadística para el contenido de clorofila foliar (valores de SPAD) registrados en avena durante cinco etapas de crecimiento (AMC=Amacollamiento, ENC=Encañe, ANT=Antesis, GLM=Grano lechoso-masoso). | 46 |

| | | |
|----|---|----|
| 12 | Medias de contenido de clorofila foliar (valores de SPAD) para tres variedades de avena forrajera durante cinco etapas de corte (AMC=amacollamiento, ENC=encañe, ANT=antesis, GLM= grano lechoso-masoso). | 47 |
| 13 | Respuesta del contenido de clorofila foliar (unidades SPAD) a cuatro dosis de nitrógeno en avena durante cinco etapas de corte (AMC=amacollamiento, ENC=encañe, ANT=entesis, GLM=grano lechoso-masoso). | 48 |

LISTA DE FIGURAS

| Número | Título de la Figura | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Producción y rendimientos unitarios de avena forrajera en el mundo (FAOSTAT, 2019). | 5 |
| 2 | Principales países productores de avena forrajera en el mundo (FAOSTAT, 2019) | 6 |
| 3 | Representación esquemática de la curva de dilución de nitrógeno (Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos, 2017A). | 24 |
| 4 | Respuesta promedio de la tasa de crecimiento del cultivo (a), tasa de crecimiento relativo (b), tasa de asimilación neta (c) y duración de área foliar (d) a cuatro dosis de nitrógeno en avena forrajera. | 38 |
| 5 | Respuesta de la tasa de crecimiento del cultivo(a), tasa de crecimiento relativo (b), tasa de asimilación neta (c) y duración de área foliar (d) a cuatro dosis de nitrógeno en tres variedades de avena forrajera. | 39 |
| 6 | Respuesta del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en tres variedades de avena a través de 6 muestreos realizados durante el ciclo de crecimiento. | 42 |
| 7 | Respuesta promedio del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a cuatro dosis de nitrógeno a través de seis muestreos realizados durante el ciclo de crecimiento en avena forrajera. | 43 |
| 8 | Superficies de respuesta del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en función a los días de crecimiento y dosis de nitrógeno en tres variedades de avena forrajera cultivadas en el valle de Toluca, México. | 45 |
| 9 | Curvas de dilución de nitrógeno estimadas a partir del rendimiento de materia seca y el contenido de nitrógeno para tres variedades de avena forrajera cultivadas en el valle de Toluca, México. | 50 |
| 10 | Relación entre la dosis de nitrógeno y el índice de nutrición de nitrógeno estimado en tres etapas de corte para tres variedades de avena forrajera. | 51 |
| 11 | Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno y el rendimiento potencial de materia seca en tres variedades forrajeras de avena cultivadas en el valle de Toluca, México. | 54 |

| | | |
|----|---|----|
| 12 | Relación entre los índices de nutrición de nitrógeno (INN) entre las diferentes etapas de corte en avena forrajera. | 55 |
|----|---|----|

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar la curva de dilución de nitrógeno en avena forrajera para valles altos. Durante el ciclo invierno-primavera de 2019 se evaluaron en el valle de Toluca, tres variedades de avena (Avemex, Karma y Obsidiana) bajo cuatro dosis de N (0, 60, 120 y 240 Kg N ha⁻¹) en un experimento bifactorial bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en condiciones de riego. Se determinó el rendimiento de materia seca (RMS) y el contenido de N en cuatro etapas de corte (encañe, embuche, anthesis y grano lechoso-masoso); Con estos datos se realizó un análisis de crecimiento y se determinó la curva de dilución de nitrógeno para cada variedad. Adicionalmente, durante del ciclo de cultivo se registró el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el contenido de clorofila foliar en unidades SPAD. Los máximos rendimientos de materia seca se obtuvieron con las dosis de 120 y 240 kg ha⁻¹ durante la etapa de grano lechoso masoso. La dosis de N afectó positivamente a los índices de crecimiento, a los valores de NDVI, y a los valores de SPAD, observándose mejores patrones de respuesta en las variedades Obsidiana y Karma, las cuales mantuvieron mayor cobertura de hojas verdes durante mayor tiempo, sin embargo, Avemex mostró mayor contenido de clorofila foliar en las últimas etapas de corte. Las variedades mostraron diferente patrón de respuesta en el contenido de N en función a la materia seca producida. Obsidiana mostró mayor tasa de dilución de N y mayor requerimiento de N para producir 1 t ha⁻¹ de materia seca. El índice de nutrición de nitrógeno mostró su mayor valor en Karma y Obsidiana en las primeras etapas de corte con las dosis más altas de N, mientras que Avemex no tuvo una respuesta definida a la dosis de N y etapa de corte. Los resultados obtenidos indican que las curvas de dilución de N, el registro del índice de vegetación de diferencia normalizada y el contenido de clorofila en unidades SPAD pueden utilizarse como eficientemente para el diagnóstico del estatus nutricional referido a nitrógeno en avena forrajera a través de las etapas del periodo vegetativo.

ABSTRACT

The objective of the present research work was to determine the nitrogen dilution curve in high valleys forage oats. During the winter-spring season of 2019, three oats varieties (Avemex, Karma and Obsidiana) were evaluated in Toluca, México valley under four N rates (0, 60, 120 and 240 Kg N ha⁻¹) in a bifactorial experiment under a randomized complete block design with three replications under irrigation conditions. Dry matter yield (RMS) and the N content were determined in four cutting stages (stem elongation, booting, headig and early dough); With these data, a growth analysis was carried out and the nitrogen dilution curve for each variety was determined. Additionally, during the growing cycle, the normalized difference vegetation index (NDVI) and foliar chlorophyll content in SPAD units were recorded. The maximum dry matter yields were obtained with rates of 120 and 240 kg N ha⁻¹ during early dough stage. Rate of N positively affected the growth rates, the NDVI values, and the SPAD values, observing better response patterns in Obsidiana and Karma varieties, which maintained greater coverage of green leaves for a longer time, however, Avemex showed higher content of foliar chlorophyll in the last stages of cutting. Oats varieties showed different response patterns in the N content as a function of the dry matter produced. Obsidian showed a higher N dilution rate and a higher N requirement to produce 1 t ha⁻¹ of dry matter. Karma and Obsidian showed highest Nitrogen nutrition index during early cutting stages with highest N rates, while Avemex shown not defined response to N rate and cutting stage. Results obtained in this work indicate that N dilution curves, vegetation index of normalized difference and chlorophyll content in SPAD units can be used efficiently for the diagnosis of the nutritional status related to nitrogen in forage oats through the stages of the vegetative period

I INTRODUCCIÓN

El manejo de la fertilización nitrogenada en cultivos extensivos es un componente tecnológico que cada día adquiere mayor relevancia ante la necesidad de elevar los rendimientos sin aumentar los costos económicos y ambientales. En el caso de los cultivos forrajeros anuales, existe una fuerte dependencia hacia el nitrógeno para elevar la producción de materia seca por unidad de superficie, pero se requiere hacer un uso más eficiente de este nutriente.

Con referencia a la avena forrajera (*Avena sativa* L.) la fertilización nitrogenada es un aspecto que debe manejarse con sumo cuidado, puesto que cuando existe deficiencia de N los rendimientos de materia seca se reducen drásticamente, y cuando hay exceso de N en la planta aumenta el riesgo de acame y se incrementa la incidencia de plagas y enfermedades. Por lo tanto, para hacer un uso más eficiente del N es necesario identificar el estado nutricional óptimo del cultivo referido al contenido de nitrógeno en los tejidos de la planta.

En forma general se sabe que a medida que aumenta la producción de la biomasa disminuye la concentración de N por efecto de dilución. Para establecer la relación funcional entre ambas variables se pueden obtener empíricamente las curvas de dilución a través de un modelo de regresión potencial ($Y=aX^{-b}$) en donde Y representa los niveles de concentración crítica de N en la biomasa área durante todo o parte del ciclo de crecimiento y hace referencia a la concentración de N requerida para lograr la tasa máxima de crecimiento del cultivo.

Otras herramientas de diagnóstico utilizadas para conocer el estatus nutricional a nivel de cultivo se basan en los índices espectrales como el índice de vegetación de diferencia normalizada que por sus siglas en inglés se abrevia como NDVI. Este índice identifica la presencia de vegetación verde y viva. Se mide en forma instantánea a nivel de parcela utilizando un dispositivo electrónico conocido como GreenSeeker cuyas lecturas representan la reflectancia en el espectro que va del rojo (650 nm) al infrarrojo cercano (770 nm). Los rangos de medición del NDVI se encuentran entre -1.0 y 1.0, siendo

los valores más altos (0.7-0.8) indicadores de plantas en las mejores condiciones. Un valor de 1 representaría la densidad más alta posible de hojas verdes y saludables. Otro indicador de contenido nitrógeno, es el medidor de clorofila SPAD que determina instantáneamente el “verdor” de las hojas de tal manera que conforme aumentan las lecturas de las unidades SPAD se infiere que el tejido de las hojas examinadas tienen mayor concentración de clorofila. En ambos casos se trata de mediciones no invasivas que están asociadas con el contenido de nitrógeno en las hojas.

En avena forrajera no se ha determinado la curva de dilución de N y se dispone de muy poca información sobre el papel que éste juega en el crecimiento y en el incremento de la materia seca, se realizó el presente trabajo con los objetivos:

- i) Estudiar el efecto de cuatro dosis de nitrógeno sobre el crecimiento y producción de forraje en tres variedades de avena recomendables para siembra comercial en Valles Altos centrales de México.
- ii) Estudiar las relaciones entre el contenido de nitrógeno en la planta con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y contenido de clorofila en las hojas (SPAD).
- iii) Determinar las curvas de dilución de nitrógeno y su relación con el rendimiento potencial de materia seca para tres variedades de avena forrajera.

Las hipótesis de trabajo fueron:

- i) La fertilización nitrógenada genera variaciones en la acumulación de materia seca y en el contenido de nitrógeno en los tejidos de las plantas de las variedades de avena forrajera.
- ii) Las variedades de avena responden en forma diferencial al incremento en la dosis de fertilización nitrogenada con relación a su crecimiento y rendimiento de materia seca.
- iii) Las lecturas del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y contenido de clorofila (SPAD) permiten conocer de manera indirecta si hay deficiencia o exceso de nitrógeno en el cultivo de avena.

II REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen, importancia y distribución de la avena forrajera

2.1.1. Origen

Los escritos antiguos indican que la avena (*Avena sativa* L.) ya existía en Asia entre 900 a 500 A. de C., aunque crecía como mala hierba junto con otros cereales. En el primer siglo D. de C. el historiador romano Plinio, mencionó que los pueblos germanos comían avena como potaje. El cultivo de avena se extendió de Egipto al occidente de Europa y a otras partes del mundo. Poco después de 1600 D. C., el grano se trajo a Norteamérica, cultivándose en el continente en 1611 por los colonos de Jamestown. En México se introdujo a finales de los 1920's por la comunidad de menonitas, un grupo religioso dedicado fundamentalmente a la agricultura en el norte del país (Terroba G. Oscar, 1994).

2.1.2. Importancia y distribución

La avena forrajera se emplea principalmente en la alimentación de ganado, como planta forrajera, en pastoreo, como heno o ensilado; habitualmente estos dos últimos aprovechamientos se realizan cuando la avena está en grano lechoso masoso o cuando está mezclado con alguna gramínea forrajera. La avena se usa sola o en combinación con leguminosas forrajeras. Su paja está considerada como muy buen alimento para el ganado, particularmente vacuno y ovino (Avena forrajera monografías s.f).

El contenido nutricional de los forrajes es esencial para el crecimiento y reproducción de animales. Los macronutrientes, elementos requeridos en grandes cantidades, son componentes importantes de huesos y tejidos, sirven como constituyentes de fluidos corporales y juegan roles vitales en las funciones metabólicas. Los micronutrientes están presentes en los tejidos del cuerpo en muy bajas concentraciones y frecuentemente sirven como componentes de metaloenzimas y cofactores enzimáticos (Montaño, 2017).

Para el año 2017, la producción mundial de avena para grano y forraje fue de 25,949,161 t (Figura 1). Hubo un incremento notorio a nivel mundial ya que desde el 2010 ha crecido su producción.

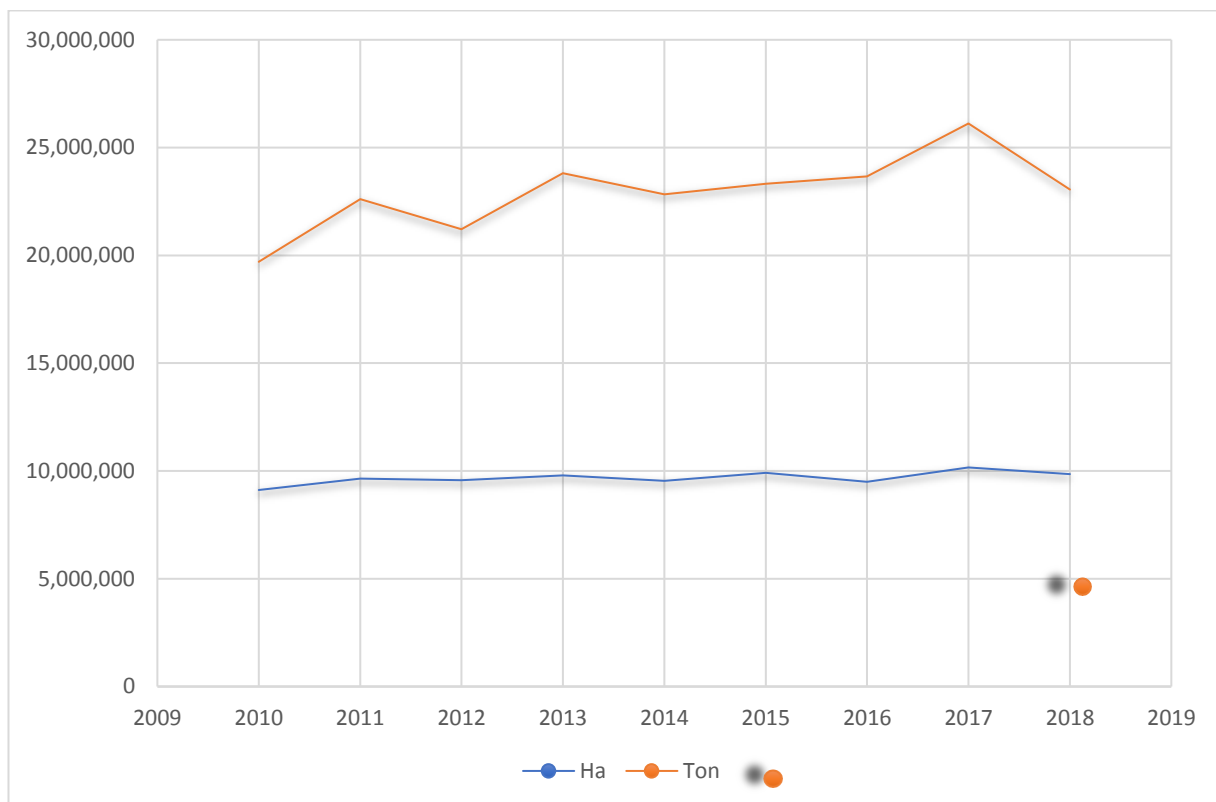


Figura 1: Producción y rendimientos unitarios de avena forrajera en el mundo (FAOSTAT, 2019).

En Europa los principales países productores son Rusia (4,695,746.11 t) Canadá (3,240,911.11 t), Polonia (1,358,117.78 t), Australia (1,324,237.89 t), Finlandia (1,000,944.44 t), España (962,769.78 t) y Estados Unidos de Norte America (948,665.56 t) (Figura 2).

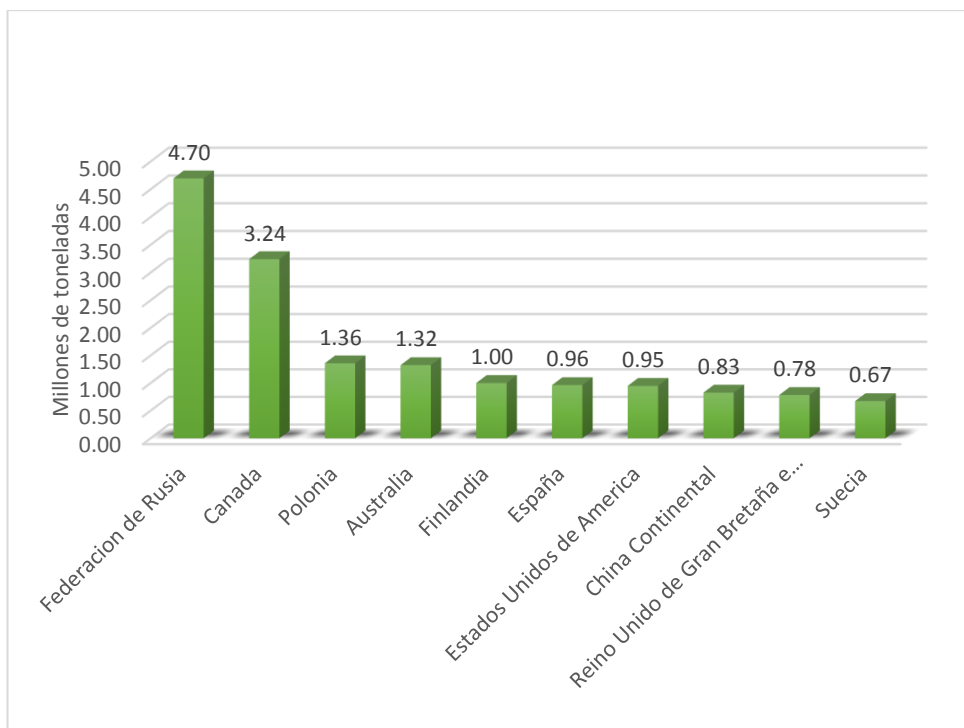


Figura 2. Principales países productores de avena forrajera en el mundo (FAOSTAT, 2019).

La avena forrajera en México es un cultivo de gran importancia para la alimentación de rumiantes como forraje verde o henificado. La siembra de avena para forraje se realiza en alrededor de 723 mil ha en temporal, con rendimientos de materia seca desde 7.5 t ha⁻¹ en ambientes desfavorables hasta 13.7 t ha⁻¹ en buenos ambientes. Bajo condiciones de riego, la avena forrajera se siembra en casi 176 mil ha, con rendimiento de MS de 23 t ha⁻¹.

Este cultivo ocupa el tercer lugar en producción de los cultivos forrajeros en México, con aproximadamente el 10%, por debajo de los pastos y la alfalfa, con 42 y 27%, respectivamente. De acuerdo con el SIAP (2017), la producción nacional de avena forrajera es de 9,682,821 t, siendo los principales estados productores de temporal Chihuahua con 24% (2,283,072 t), Durango con 19% (1,874,179 t), Zacatecas con 12% (1,114,065 t) y Estado de México con 10% (1,002,540 t).

En el Estado de Mexico, en Otoño-Invierno del 2018 se sembraron 6,326 ha y en Primavera-Verano 48,633 ha, con una producción promedio de

1,176,064.65 t. Los principales municipios productores son Villa Victoria, Villa de Allende, Almoloya de Juárez, Texcoco, Acambay, Xalatlaco, San José del Rincón y San Bartolo Morelos (SEDAGRO, 2017).

Cuadro 1: Principales estados productores de avena forrajera (SIAP, 2017).

| Lugar | Entidad Federativa | Volumen (t) | | Variación (%) |
|-------|--------------------|-------------|-----------|---------------|
| | | 2012 | 2017 | 2012-2017 |
| | Nacional | 10,903,361 | 9,682,821 | -11.2 |
| 1 | Chihuahua | 2,934,535 | 2,283,072 | -22.2 |
| 2 | Durango | 1,949,280 | 1,874,179 | -3.9 |
| 3 | Zacatecas | 967,597 | 1,114,065 | 15.1 |
| 4 | Estado de México | 1,516,188 | 1,002,540 | -33.9 |
| 5 | Coahuila | 507,093 | 561,345 | 10.7 |
| 6 | Hidalgo | 484,939 | 470,356 | -3.0 |
| 7 | Michoacán | 367,629 | 444,948 | 21.0 |
| 8 | Guanajuato | 381,494 | 375,982 | -1.5 |
| 9 | Jalisco | 253,817 | 338,224 | 33.3 |
| 10 | Baja California | 115,228 | 179,630 | 55.9 |
| | Resto | 1,425,561 | 1,038,571 | -27.1 |

2.2. Prácticas de manejo

2.2.1. Características y requerimientos del cultivo

La avena es una gramínea anual, adaptada a climas fríos y húmedos, sensible a altas temperaturas, especialmente en floración y formación de grano. Posee hojas alargadas, tallos gruesos y erectos y raíces abundantes y profundas. Es una planta que consume más agua que otros cereales pero muestra baja tolerancia al exceso de humedad (SAGARPA, 2014).

La avena se adapta bien a más de 1500 msnm en zonas tropicales y de 1,000 a 3,000 msnm en zonas templadas. Los requerimientos de precipitación son de 250 a 800 mm/ciclo, con un óptimo de 500 mm, mientras que el rango de temperatura varía de 5 a 30 °C, con una óptima de 17.5 °C. La avena prefiere suelos arcillo-limosos y franco-arcillosos, no calcáreos, con una textura limosa como la óptima para su crecimiento y desarrollo. Se adapta mejor a suelos profundos, entre 40 y 60 cm y con pH de 4.5 a 7.5, con un óptimo entre 5 y 6 (Financiera Rural, 2010).

2.2.2 Preparación del terreno

Éste debe prepararse con barbecho y rastreo para obtener un suelo adecuado para la germinación y crecimiento del cultivo. En la planeación de estas actividades, es importante considerar la cantidad y distribución de la precipitación, así como la capacidad de los suelos para retener humedad.

El barbecho se efectúa mediante arado de discos y sirve para voltear la tierra con el fin de incrementar la capacidad de almacenamiento de agua. En suelos con problemas de compactación y precipitaciones superiores a 300 mm se recomienda un barbecho entre 30 y 40 cm de profundidad. Los suelos arcillosos se deben barbechar con más anticipación que los arenosos para permitir una buena granulación de la tierra.

Posterior al barbecho es necesario realizar el rastreo, con el objetivo de crear una cama fina para la germinación de las semillas. Esta labor se realiza con rastra de discos o de dientes y uno o dos pasos de rastra, según el problema de malezas y la textura del suelo. En suelos con mínimo o ligero problema de malezas, es posible dar un solo rastreo después de la primera lluvia. En suelos con alta incidencia de malezas es recomendable dar un paso de rastra para que el suelo capte agua y dar otro paso de rastra después de la emergencia de malezas para eliminarlas y sembrar de inmediato. En suelos pesados también pueden ser necesarios dos pasos de rastra para dejar el suelo bien mullido.

Se recomienda la nivelación del terreno para permitir una mejor distribución y aprovechamiento del agua (Squella & Ormeño, 2007).

2.2.3. Época de siembra

La siembra bajo condiciones de temporal debe efectuarse entre junio y julio, dependiendo de la variedad y de la presencia de lluvias. Para riego debe sembrarse entre noviembre y diciembre.

Es importante seguir las recomendaciones ya que una variedad sembrada fuera de su fecha recomendada reduce su rendimiento y se incrementa el riesgo de ser afectada por siniestros (Squella & Ormeño, 2007).

2.2.4. Método y densidad de siembra

Se pueden utilizar diferentes métodos de siembra, dependiendo de la disponibilidad de maquinaria y de la topografía del terreno: cuando es plano, en hileras se recomienda utilizar una sembradora “triguera” o de granos pequeños. La distancia entre hileras puede variar según las condiciones y la marca de la sembradora. Lo más común es sembrar a una distancia de 11 a 25 cm entre hileras y a una profundidad de 6 cm. Para terrenos con poca pendiente se sugiere el uso de corrugaciones o surcos. En el primer caso, posterior a la siembra, se levanta un surcado de 15 cm de profundidad con separación entre hileras de 30 a 40 cm. Para la siembra en surcos, después de preparar el terreno, se forman los surcos de 70-80 cm de separación, luego se siembra y se fertiliza al mismo tiempo, utilizando la sembradora convencional de granos pequeños (Squella & Ormeño, 2007)

Otro método de siembra es al voleo, ya sea en forma manual o utilizando la “voleadora”, que distribuye la semilla en un ancho de 8 a 12 m. La semilla se tapa con un paso de rastra ligero o usando una rastra de dientes, cuidando que la semilla no quede a una profundidad mayor a 8 cm. Generalmente, la siembra se hace en húmedo o tierra venida, después de las primeras lluvias, con el fin de lograr un mejor aprovechamiento de la humedad del suelo. Se recomienda utilizar de 90 a 110 kg de semilla ha⁻¹, con un mínimo de germinación del 85%, para asegurar una buena densidad de población. Se

utiliza más semilla en siembras al voleo (110 kg ha^{-1}) cuando el terreno presenta alta infestación de malezas o cuando se esperan buenas condiciones de crecimiento (precipitaciones superiores a 300 mm durante el ciclo) (Villaseñor *et al.*, 2008).

2.2.5. Fertilización

En avena, el nitrógeno es el elemento más importante, y generalmente se aplican de 30 a 60 kg ha^{-1} , con mayores cantidades en años húmedos. Se recomienda mezclar el fertilizante con la semilla y después tapar la semilla. En caso de no haber fertilizado a la siembra y que se esté presentando un buen temporal o haya buena humedad, se puede aplicar de 20 a $40 \text{ kg de N ha}^{-1}$ en amacollamiento, antes de la aparición del primer nudo, entre 25 y 35 días de la siembra.

La fertilización debe realizarse al sembrar con 60N-40P-00K para buenas condiciones de humedad y 30N-40P-00K para escasa humedad en el suelo. El fósforo es el segundo nutriente en importancia y es necesario para el buen desarrollo de las raíces, especialmente en las primeras etapas de crecimiento. Se recomienda aplicar 40 kg ha^{-1} al sembrar (Espitia *et al.*, 2012).

2.2.6. Control de maleza

Los problemas de malezas pueden afectar al rendimiento y a la calidad del forraje, además de que pueden ser huéspedes de plagas y enfermedades. Las malezas que predominan durante el desarrollo del cultivo son de tipo anual: de hoja angosta como avena silvestre y de hoja ancha como mostacilla (*Brassica campestris*), rabanillo (*Raphanus raphanistrum*) y mostaza (*Brassica nigra*). El control de malezas es esencial durante las primeras etapas del crecimiento. La reducción en el rendimiento es mayor cuando las malezas se establecen antes del amacollamiento. El control de malezas requiere de labores culturales y de la aplicación cuidadosa de herbicidas específicos. Las labores culturales consisten de rastreos en el verano y el

otoño durante un año, lo que además ayuda a conservar la humedad del suelo. El uso de semilla certificada ayuda a prevenir la introducción y dispersión de nuevas malezas.

Otras prácticas que ayudan a controlar o minimizar la competencia con malezas son la preparación oportuna del terreno, selección de la variedad adecuada, densidad y profundidad de siembra y utilización adecuada de los fertilizantes, así como mantener libre de malezas a áreas problemáticas como cercos, bordos, orillas de caminos, etc.

En general, no hay problemas de maleza en el cultivo de avena pero si se presenta se recomienda aplicar 2-4D Amina para el control de las de hoja ancha. La aspersión se hace en amacollamiento, entre los 25 y 35 días de la siembra. Las malezas pueden ocasionar pérdidas hasta del 40% en el rendimiento de su forraje.

El control químico de las malezas de hoja angosta (gramíneas) es más difícil porque pertenecen a la misma familia que la avena. En la actualidad existen productos como el tritosulfuron o el dicamba que en dosis muy bajas tienen buenos resultados en este cultivo (Jurado, 2014).

2.2.7. Manejo de plagas

La plaga más común en el cultivo de avena es el pulgón de la espiga (*Sitobium avenae*), el cual aparece durante la etapa de embuche hasta grano masoso. Cuando se presenta una infestación de 10 pulgones por espiga en un muestreo de 100 espigas, se recomienda aplicar Malatión CE 50 y Paratión metílico CE50 en dosis de 1.0 L ha⁻¹. Las plagas que se pueden presentar esporádicamente son los pulgones del cogollo y del follaje (*Rhopalosiphum spp*), pero estos causan un daño mínimo y por lo tanto no se recomienda su control.

2.2.8. Enfermedades

La avena puede ser afectada por enfermedades bajo ciertas condiciones ambientales. La más importante es la roya (*Puccinia coronata f. sp. avenae*) que ataca hojas y tallos, disminuyendo la producción y la calidad del forraje. Se caracteriza por ocasionar lesiones redondas u ovaladas que varían del color amarillo naranja al café rojizo. La medida de control más importante es la utilización de variedades resistentes (Jurado, 2014).

2.2.9. Cosecha

La cosecha del forraje de avena se hace comúnmente en la etapa de madurez fisiológica del grano, con rendimientos de 5.0 a 6.0 t de forraje seco ha⁻¹, con un contenido de proteína cruda (PC) menor de 10.5 %, el de fibra detergente neutro (FDN) mayor a 61.4 %, y el de energía neta de lactancia (ENL) de 1.63 Mcal kg⁻¹ de MS.

El corte del forraje de avena está en función del rendimiento de materia seca y de la calidad que se desea obtener; así como del uso que se le va a dar y del ganado que se va a alimentar. Dependiendo de la variedad, la cosecha se realiza entre 87 y 109 días de la siembra en madurez fisiológica, con segadora mecánica o manualmente con hoz; se deja secar en el suelo en hileras durante dos o tres días, dependiendo del estado del tiempo. Posteriormente se voltea para que se seque por el otro lado y se empaca. Es importante ajustar apropiadamente la maquinaria para lograr una cosecha óptima.

La avena puede producir un excelente ensilaje con altos nutrientes digestibles pero no es comparable con los ensilajes para maíz o sorgo. En caso de realizarlo, se recomienda que la avena contenga entre 60 y 70% de humedad (grano masoso blando). En ocasiones se requiere la aplicación de preservativos químicos, pero lo más importante es hacer una buena compactación del forraje para lograr un buen sellado del silo.

2.2.10. Pastoreo

La avena puede pastorearse aun cuando se presentan pérdidas del 20 al 35%. El pastoreo con animales jóvenes debe realizarse antes del espigamiento para aprovechar la mayor calidad del forraje. Sin embargo, existe el riesgo de intoxicación por nitratos. Si se pastorea, se recomienda evitar el pastoreo en condiciones de suelo húmedo, realizar una rotación de potreros y proporcionar suplementos minerales (Espita *et. al.*, 2012).

2.3. Variedades elegidas

2.3.1. Karma

Variedad de ciclo intermedio, liberada en 1998 por el Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), de hábito de crecimiento invernal, florece entre 50 y 57 días y presenta madurez fisiológica entre 90 y 93 días después de la siembra. En el estado de Chihuahua es resistente al acame, aunque en los Valles Altos de México es moderadamente susceptible al acame y moderadamente resistente a roya del tallo (*Puccinia graminis Persoon f. sp. avenae*). Sus características distintivas son: alta relación panícula-tallo, mayor número de granos por panícula y tallos huecos y moderadamente suaves, lo que la hace apta para el uso forrajero, el grano es aristado de color café. Se recomienda para siembras intermedias y tardías en ambientes de mediana y buena productividad. Es adecuada para sembrarse en condiciones de riego en el invierno para producir forraje y grano, en fechas de diciembre a enero (Jurado, 2014).

2.3.2. Obsidiana

Ésta es de ciclo intermedio-tardío, con floración de 55 a 62 días y madurez fisiológica de 90 a 101 días después de la siembra; es tolerante al acame y de porte medio. El grano es grande, de color amarillo. La variedad fluctúa de resistente a moderadamente susceptible para la roya del tallo (*Puccinia graminis Persoon f. sp. avenae*) y de resistente a moderadamente resistente a la roya de la hoja (*Puccinia coronata f. sp. avenae*). Esta variedad no

presenta otras enfermedades foliares en condiciones de baja humedad, como las que se presentan en el estado de Chihuahua. Obsidiana supera a las variedades Menonita, Bachiniva, Chihuahua y Karma bajo condiciones de temporal. El valor nutricional del forraje de Obsidiana es similar al de Chihuahua y Cuauhtémoc.

En invierno esta variedad es la mejor opción para producir grano en condiciones de riego y es buena alternativa para la producción de forraje verde henificado. Su época de siembra varía de noviembre a enero (Espitia *et. al.*, 2008).

2.3.3. Avemex

Variedad liberada por el INIFAP en 1998. Es recomendable para la producción de forraje verde y forraje henificado, y aunque tiene menor potencial de rendimiento en grano que Karma, su rendimiento es aceptable. Su ciclo es de 112 a 140 días a madurez fisiológica (ciclo tardío), con una altura de planta de 110 a 170 cm (porte alto) y buena capacidad de amacollamiento.

Los tallos de esta variedad son gruesos y moderadamente susceptibles al acame. Paja de color amarillo medio, panícula grande y grano café claro; es moderadamente resistente al desgrane, al complejo de enfermedades foliares y a la roya de la hoja (*Puccinia coronata f. sp. avenae*). Puede ser resistente a moderadamente susceptible a la roya del tallo, dependiendo de la raza fisiológica que esté presente y es tolerante a la sequía.

En los Valles Altos esta variedad es la mejor opción para la producción de forraje verde o henificado durante el invierno en condiciones de riego. Se siembra desde noviembre a enero (Villaseñor *et al.*, 2008).

2.4. Etapas de desarrollo

Para tener una mejor idea del ciclo vegetativo del cultivo de avena se puede recurrir a escalas de desarrollo como la de Zadocks (1972), la cual se basa en código decimal 0-99 y se utiliza a nivel internacional, sobre todo para

recomendaciones de manejo (e.g. aplicación oportuna de plaguicidas y fertilizantes). La escala de Zadocks tiene diez etapas (0-9) y para cada una de éstas se pueden definir hasta diez subetapas:

- Etapa 0: germinación

Z00: semilla seca
Z01: inicio de absorción de agua
Z03: semilla totalmente hinchada
Z05: primera raíz emergida de la semilla
Z07: coleóptilo emergido de la semilla
Z09: primera hoja verde, justo en la punta del coleóptilo

- Etapa 1: crecimiento de la plántula

Z10: primera hoja a través del coleóptilo
Z11: primera hoja emergida
Z12: dos hojas emergidas
Z13: tres hojas emergidas
Z14: cuatro hojas emergidas
Z15: cinco hojas emergidas
Z16: seis hojas emergidas
Z17: siete hojas emergidas
Z18: ocho hojas emergidas
Z19: nueve o más hojas emergidas

- Etapa 3: elongación del tallo

Z30: pseudotallo (hoja más joven erecta)
Z31: primer nudo detectable
Z32: segundo nudo detectable
Z33: tercer nudo detectable
Z34: cuarto nudo detectable
Z35: quinto nudo detectable
Z36: sexto nudo detectable
Z37: hoja bandera visible
Z39: lígula de la hoja bandera visible

- Etapa 4: embuche

Z41: lámina de la hoja bandera extendida

Z43: inicio de la vaina engrosada

Z45: vaina engrosada (embuche)

Z47: hoja bandera extendida

Z49: primeras aristas visibles en la panícula

- Etapa 5: emergencia de la panícula

Z51: punta de la panícula visible

Z53: $\frac{1}{4}$ de panícula emergida

Z54: $\frac{1}{2}$ de panícula emergida

Z57: $\frac{3}{4}$ de panícula emergida

Z59: panícula totalmente emergida

- Etapa 6: antesis

Z61: inicio de la antesis (pocas anteras visibles en la panícula)

Z65: 50% de antesis (anteras expuestas en la parte central)

Z69: antesis completa (anteras totalmente expuestas)

- Etapa 7: desarrollo lechoso

Z71: estado acuoso (sin almidón en el endospermo)

Z73: lechoso temprano

Z74: lechoso medio

Z77: lechoso tardío

- Etapa 8: desarrollo masoso

Z81: masoso temprano

Z85: masoso suave

Z87: masoso duro

- Etapa 9: maduración

Z91: grano duro difícil de dividir

Z92: grano duro, imposible de marcar con la uña del dedo

Z93: grano completamente maduro (dehiscente durante el día)

2.5. Papel del nitrógeno en el crecimiento y en la productividad de la avena forrajera

El nitrógeno, representado como N, número atómico 7, pertenece al grupo 15 de la tabla periódica (grupo de los no metales); en condiciones normales forma un gas diatómico N_2 (nitrógeno diatómico o molecular) que constituye el 78,1% del volumen del aire atmosférico (Juárez, 2011).

Es un macro-elemento esencial para el crecimiento de las plantas y se puede encontrar en los aminoácidos (forma parte de las proteínas), en las amidas, en la clorofila, y en las hormonas (auxinas y citoquininas, nucleótidos, vitaminas, alcaloides y ácidos nucleicos) (Alessandri, 2009).

El nitrógeno en forma de aminoácidos es una componente importante de las fibras animales y es componente esencial de los ácidos nucleicos, vitales para los seres vivos. Es un elemento importante en la nutrición de las plantas. Las leguminosas son capaces de fijar el nitrógeno directamente del aire, siendo éste transformado en amoníaco y luego en nitrato por bacterias que viven en simbiosis en las raíces de las plantas. El nitrato es posteriormente utilizado por la planta para formar el grupo amino de los aminoácidos de las proteínas, que finalmente se incorporan a la cadena trófica.

Las formas N inorgánico puede se puede absorber a través de las raíces en forma de nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Como la mayor parte del N del suelo está en forma orgánica es necesaria una actividad microbiológica que lo convierta en amonio o nitrato (Las Nitrosomas y Nitrobacter son las bacterias más comunes en esta tarea). Si la planta absorbe nitrato tiene que reducirlo a forma amoniacal antes de que pase a formar parte de los compuestos orgánicos. El amonio no se acumula sino que se incorpora directamente a compuestos como la glutamina, procedentes del ciclo de Krebs.

Cuando se presentan deficiencias de N en las plantas disminuye su crecimiento, las hojas son más pequeñas y se reduce la síntesis de clorofila,

de este modo surge la clorosis (hojas amarillas). Este efecto empieza en las hojas de mayor edad, que llegar a caerse y si la deficiencia es severa puede aparecer clorosis en las hojas más jóvenes, lo cual disminuye el tamaño de los frutos y su cuajado (Juárez, 2011).

Se considera que el N es el elemento que limita con mayor intensidad a los rendimientos en cualquier sistema productivo, y resulta más importante su consideración cuanto más intensiva se vuelva la producción.

Mediante la fertilización nitrogenada se logra, entre otros aspectos, obtener buenos rendimientos, favorecer el crecimiento de los cultivos de ciclo precoz en el tiempo, con lo cual se puede adelantar la fecha del primer pastoreo y prolongar los períodos de crecimiento, entre otras cosas. Además de esto, la utilización de fertilizantes nitrogenados permite maximizar la utilización de los recursos naturales con los que se cuenta, de manera que permite aumentar la producción de forraje manteniendo estable la superficie utilizada.

La respuesta de las plantas al nitrógeno aportado por los fertilizantes depende de una serie de factores que limitan o promueven las posibilidades de alcanzar los máximos beneficios, entre ellos, factores climáticos, edáficos, genéticos, fisiológicos y de interacción entre ellos.

En lo que a factores climáticos respecta, se puede decir que la temperatura y la humedad son las variables que más inciden en la respuesta al fertilizante nitrogenado. La absorción de nitrógeno está íntimamente relacionada con la actividad de las plantas, y por tanto, si coexisten temperaturas muy altas o muy bajas, y/o hay deficiencias hídricas que comprometan el crecimiento y desarrollo de las mismas, se verá impedida la utilización eficiente del nutriente (Juárez, 2017).

La fertilización nitrogenada en avena forrajera produce un rápido crecimiento y mayor producción de materia seca, variando la respuesta básicamente de acuerdo con la fuente de nitrógeno empleada, momento de aplicación, dosis y contenido de humedad y nitratos del suelo. Cuando el nitrógeno es aplicado con la semilla puede haber problemas durante la germinación. Las sembradoras que no separan al fertilizante de la semilla provocan fitotoxicidad y muerte de plántulas cuando se sobrepasan ciertas dosis.

La aplicación de dosis altas de N en avena puede llevarse a cabo en forma fraccionada, en las etapas fenológicas importantes de este cultivo. Gracias a esto se evita la fitotoxicidad y la muerte de plantas. La buena respuesta de la avena al incremento del N puede hacer de la fertilización nitrogenada una práctica altamente rentable en la producción de carne o leche (Fontanetto, 2016), lo que puede constituir una herramienta, no sólo para incrementar la producción y calidad del grano, sino también para inducir mayor producción de materia seca. El uso de fertilizantes como el N puede generar cambios en la cantidad y composición química de la biomasa producida (Denda, 2017).

2.6. Análisis del crecimiento en cultivos extensivos

El crecimiento de la planta representa la división y expansión de muchos tipos de células que dan origen a los tejidos de distintos órganos: raíz, hojas, tallos, flores, frutos, etc. El análisis de crecimiento es una expresión cuantitativa que utiliza datos simples y básicos para la descripción e interpretación del crecimiento de comunidades de plantas que comparten el mismo espacio y tiempo. Existen medidas directas del crecimiento como área foliar: obtenida como la superficie adaxial de las hojas fotosintéticamente activas, a través de métodos directos (planimetría, escaneo, análisis de imágenes) o mediante métodos alométricos (modelos de regresión entre el área y las dimensiones de las hojas; largo y ancho). Materia seca: peso de los órganos de la planta después de haber sido sometidos a secado (deshidratado) hasta alcanzar peso constante.

El método clásico para el análisis de crecimiento está basado en las fórmulas propuestas por Watson (1952), Yoshida (1972) y Hunt (1978). Gardner *et al.*, (2003); incluye a los siguientes índices o parámetros:

2.6.1 Tasa de crecimiento del cultivo

Se refiere a la tasa de acumulación de materia seca por unidad de área y normalmente se expresa en $\text{g m}^2 \text{ día}^{-1}$. Este parámetro se estima mediante el muestreo de biomasa (sin considerar el sistema radical) en intervalos de

tiempo frecuentes y permite conocer el incremento en peso seco dentro de un intervalo de tiempo. Su cálculo se basa en:

$$TCC = \frac{1}{A_s} \times \frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)}$$

A_s=área de suelo ocupada por las plantas en dónde se realizó el muestreo.

W₁ y W₂=peso seco de la biomasa obtenido en el muestreo inicial y en el final del periodo especificado.

T₂-T₁=periodo de tiempo, registrado en días.

La máxima TCC ocurre cuando las plantas son suficientemente grandes o el cultivo es lo suficientemente denso para explotar todos los factores ambientales en el mayor grado posible (Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos, 2017).

2.6.2 Tasa de crecimiento relativo (TCR)

La tasa de crecimiento relativo (TCR) se refiere al incremento en peso por unidad de peso inicial y puede expresarse en g (g de peso seco)⁻¹ día⁻¹

$$TCR = \frac{(\ln W_2 - \ln W_1)}{(T_2 - T_1)}$$

Ln= Logaritmo natural.

La TCR disminuye conforme avanza el ciclo del cultivo debido al hecho de que hacia la madurez fisiológica buena parte de los fotoasimilados forman tejidos estructurales más que tejidos metabólicamente activos que no contribuyen al crecimiento. (Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos, 2017).

2.6.3. Índice de área foliar (IAF)

Éste se obtiene al dividir la superficie de la lámina foliar (**AF**) de hojas fotosintéticamente activas entre el área de superficie del suelo que ocupan las plantas.

Para muestreos a intervalos de tiempo, el IAF puede calcularse cómo:

$$IAF = \frac{\frac{(AF2+AF1)}{2}}{\frac{1}{As}}$$

AF= área foliar en cada muestreo.

(Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos, 2017).

2.6.4. Tasa de asimilación neta (TAN)

En virtud de que la superficie de las hojas intercepta la luz del sol y absorbe el CO₂ en la fotosíntesis, es deseable en algunos casos expresar el crecimiento sobre la base del área foliar. La acumulación de peso seco por unidad de área foliar se conoce como TAN y se obtiene cómo:

$$TAN = \frac{\frac{(W2-W1)}{(T2-T1)}}{\frac{(\ln AF2 - \ln AF1)}{(AF2-AF1)}}$$

La TAN se expresa en g (m² de área foliar)⁻¹ día⁻¹ y es una medida de la eficiencia promedio de las hojas para fijar CO₂.

La TAN es alta cuando las hojas están expuestas totalmente a la luz solar y, por lo tanto, siempre es mayor cuando las plantas son pequeñas y las hojas no se somborean.

La TAN decrece conforme avanza el ciclo de cultivo debido a que las hojas viejas entran en senescencia y muestran baja eficiencia fotosintética en los diferentes estratos de la planta, por ejemplo: tallos, peciolo o inflorescencias (Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos, 2017).

2.6.5 Duración de área foliar (DAF)

Ésta permite identificar los cambios que ocurren en el área foliar a través del tiempo y de este modo tener una aproximación de la permanencia de hojas vivas (fotosintéticamente activas) y senescentes (hojas muertas). Se expresa en cm² día¹ o cm² semana¹.

$$DAF = \frac{(AF2 + AF1) \times (T2 - T1)}{2}$$

Teóricamente las plantas que mantienen por periodos más largos sus hojas vivas requieren menor inversión de energía para mantener su dosel activo y son más eficientes fotosintéticamente (Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos, 2017).

2.7. Curva de dilución del nitrógeno

La obtención de altos rendimientos de forraje depende entre otros aspectos de identificar el óptimo estado nutricional del cultivo. Para esto es necesario contar con herramientas de diagnóstico como lo es el análisis de nutrientes en planta y su interpretación mediante curvas de dilución. Las curvas de dilución son definidas por los niveles de concentración crítica del nutriente en la biomasa aérea durante todo o parte del ciclo del cultivo.

Para el caso de nitrógeno, esta concentración crítica ha sido definida **como la mínima concentración requerida para lograr la máxima tasa de crecimiento del cultivo**, y varía con la biomasa aérea producida, ya que a medida que se incrementa la producción de biomasa se presenta un efecto de dilución del nitrógeno en la planta (Frigerio *et al.*, 2016).

Se sabe que el contenido de N en la planta decae durante el ciclo de crecimiento de los cultivos. Esto es debido a respuestas fisiológicas derivadas de situaciones como la posición de las hojas, el aumento proporcional de tejidos estructurales y de almacenamiento a medida que transcurre el ciclo del cultivo. La relación entre el nitrógeno absorbido por la planta y la materia seca acumulada establecen una ecuación alométrica que vincula estas dos

variables. A partir de esta ecuación se obtiene una curva donde cada punto representa **la mínima concentración de N observada en planta para una determinada acumulación de biomasa aérea**. (Figura 3.). Esta curva se denomina de dilución de nitrógeno.

Para estudiar el estado de nutrición con nitrógeno se utiliza el Índice de Nutrición Nitrogenada (INN), que relaciona el contenido de N experimental con el N crítico o teórico que debería contener la biomasa obtenida en una muestra (Ferreira y Ernst, 2014).

Si $INN > 1$ el cultivo se encuentra en condición supraóptima de nutrición de N.

(Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos, 2017).

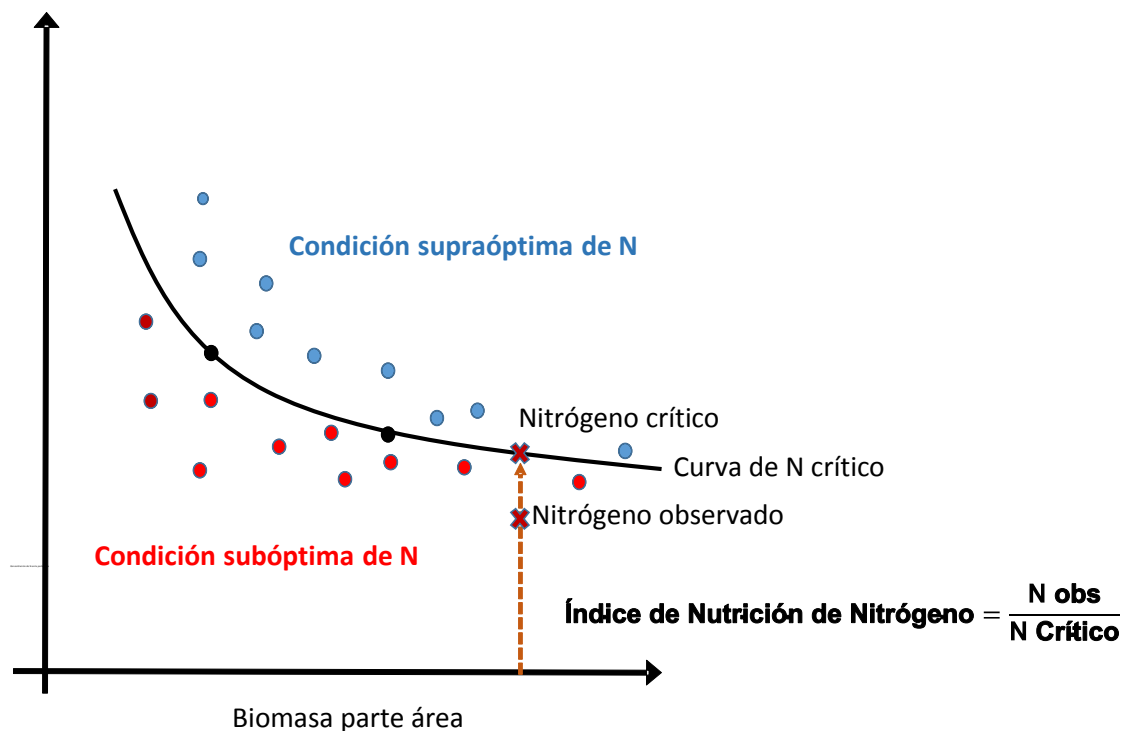


Figura 3. Representación esquemática de la curva de dilución de nitrógeno (Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos, 2017A).

2.8. Otros Indicadores de estatus nutricional

El GreenSeeker (green = verde y seeker = buscador) es un instrumento que provee un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), cuya

interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de condiciones nutricionales (especialmente de nitrógeno), el estado fisiológico, la incidencia de estrés, y el rendimiento potencial de los cultivos. Este índice se denomina “normalizado” porque produce valores en el rango del 1 y -1. El NDVI permite integrar y analizar mediciones de luz del rojo y rojo lejano realizadas con sensores remotos o próximos a las plantas, e identificar la presencia de vegetación verde y viva con base en su reflexión en los ámbitos de frecuencia de la luz correspondientes en ambos colores (Gutierrez *et. al.*, 2011).

Es un sistema que provee información obtenida localmente y de forma rápida mediante determinaciones terrestres. Los rangos de medición del NDVI se encuentran entre -1.0 y 1.0, siendo los valores más altos (0,7-0,8) indicadores de plantas en las mejores condiciones. Un valor de 1 representaría la densidad más alta posible de hojas verdes y saludables. Los suelos descubiertos generan valores positivos bajos (0.1 a 0.2), y el agua libre valores que van desde -0.1 hasta 0.1 ó 0,2. Valores de -1 se registran en superficies blancas como la nieve, el hielo o las nubes, 0 indica ausencia de vegetación.

El mapeo de los terrenos usando el GreenSeeker y otros accesorios, como termómetros infrarrojos y sistemas de posicionamiento geográfico (GPS), permitiría la distribución de los insumos agrícolas según los requerimientos de los cultivos, en diferentes zonas y etapas fenológicas. El uso de esta instrumentación como componente de la maquinaria agrícola moderna puede dirigir la dosificación eficiente del agua, los fertilizantes, y otros agroquímicos con claros efectos positivos sobre el ambiente y las finanzas del sistema productivo.

Otro indicador de contenido nitrogeno, es el medidor de clorofila SPAD que determina instantáneamente el contenido de clorofila o “verdor” de sus plantas y reduce el riesgo de tener deficiencias que limiten el rendimiento, o una fertilización costosa. El SPAD cuantifica cambios sutiles o tendencias en la salud de las plantas mucho antes que sean visibles al ojo humano. Es una medición no invasiva, simplemente se coloca el medidor sobre el tejido de la hoja y se recibe una lectura del contenido indexado de clorofila (0-99.9), en menos de dos segundos.

Fue diseñado para ayudar a mejorar o remediar la calidad de los cultivos con el fin de incrementar su productividad, mediante la detección de la cantidad de clorofila presente en las hojas de las plantas. El contenido de clorofila de las hojas de una planta está relacionado con la condición de la planta y, así, se puede utilizar para determinar cuándo es necesario una fertilización adicional. Optimizando las condiciones de los nutrientes, las plantas pueden crecer más saludables, lo que conlleva a una mayor cosecha y mejor calidad (Mendoza *et al.*, 1998).

Los valores SPAD se obtienen en función del principio que considera que parte de la luz que llega a la hoja es absorbida por la clorofila y la parte que se refleja entra en contacto con la celda SPAD donde se transforma en una señal eléctrica. La luz captada por la celda es inversamente proporcional a la luz utilizada por la clorofila, la señal es procesada, la absorbancia se cuantifica en valores dimensionales que van de 0 a 199 y las unidades SPAD serán siempre las mismas, según el tono verde de las hojas. El medidor SPAD, permite determinar el contenido de clorofila en tejidos vegetales sin necesidad de destruir las muestras.

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del trabajo experimental

El presente trabajo se desarrolló durante el ciclo Invierno-Primavera 2018-2019 en los Campos Experimentales de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicada en el Campus Universitario “El Cerrillo”, Toluca, México (19° 42' LN, 99° 41' LW, 2640 msnm). La región del clima es Cwb: Templado con inviernos secos, lluvias en verano y poca oscilación térmica. La temperatura media anual es de 14°C y la precipitación oscila alrededor de los 900mm al año. Los suelos predominantes son delgados de textura franco-arcillosa de origen volcánico, con alta compactación y bajo contenido de materia orgánica.

Cuadro 2. Análisis de suelo lote experimental. Laboratorio de Edafología Facultad de Ciencias Agrícolas de la U.A.E.Mex., 2018.

| Propiedad | Unidad | Resultado | Clasificación | Óptimo |
|----------------------------|-----------|-----------|-------------------|-------------|
| pH | | 6,16 | Ligeramente ácido | 5.8 – 6.5 |
| CIC | Cmol/kg S | 23,8 | Medio | 30 – 45 |
| Carbono orgánico | % | 2,47 | Bajo | 11 – 20 |
| Materia orgánica | % | 4,26 | Bajo | 6 – 10 |
| Conductividad eléctrica | dS/cm | 0,06 | Normal | 0 – 2 |
| Nitrógeno total | % | 0,10 | Medio | 0,30 – 0,80 |
| Fósforo | ppm | 16,98 | Medio | 16 – 30 |
| Potasio | ppm | 20,1 | Muy bajo | 180 – 250 |
| Relación carbono/nitrógeno | % | 23,8 | Mala | 8 – 12 |

| | | | | |
|-------------------|-------------------|-------|------------------------|-------------|
| Calcio | ppm | 741,9 | Bajo | 1000 – 1800 |
| Magnesio | ppm | 40,1 | Bajo | 120 – 220 |
| Sodio | ppm | 16,8 | Muy bajo | 30 – 60 |
| Densidad aparente | g/cm ³ | 1,20 | Bajo | N/A |
| Textura | % Arena | 46,4 | Franco arcillo arenoso | N/A |
| | % Arcilla | 28 | | |
| | % Limo | 25,6 | | |

En el Cuadro 2 se muestran las características físicas y químicas del suelo en donde se llevó a cabo el experimento. El análisis de suelo se realizó en el laboratorio de suelos de la facultad de ciencias agrícolas de la U.A.E.Mex.

Cuadro 3. Condiciones climáticas ocurridas durante la conducción del trabajo experimental

| Mes | T máxima | T Mínima | T Media | pp Total |
|---------|----------|----------|---------|----------|
| | °C | | | Mm |
| Enero | 19.4 | 1.0 | 10.2 | 2.6 |
| Febrero | 23.3 | 1.8 | 12.6 | 6.4 |
| Marzo | 25.2 | 4.3 | 14.7 | 34.8 |
| Abril | 24.6 | 3.4 | 14.0 | 13.2 |
| | | | Total | 57.0 |

En el Cuadro 3 se muestran los datos climáticos de los meses en los que se llevó a cabo el experimento, tomados de la estación meteorológica de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la U.A.E.Méx.

3.2.- Factores de estudio y diseño experimental

Se evaluaron tres variedades de avena comercial liberadas por el INIFAP: Avemex, Obsidiana y Karma y cuatro dosis de fertilización nitrogenada (0, 60, 120 y 240 kg de N ha⁻¹). Los 12 tratamientos se evaluaron en campo en un experimento bifactorial 4 x 3, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La parcela experimental estuvo integrada por cuatro camas de siembra a doble hilera con longitud de 6 m, con distancias entre camas de 80 cm y entre hileras de 20 cm. La parcela experimental útil abarcó los 5 m interiores de las dos camas centrales.

3.3. Manejo agronómico del experimento

El experimento se desarrolló bajo condiciones de riego en el ciclo Invierno-primavera del 2019. La preparación del terreno se hizo en la primera semana de enero y consistió en dos pasos de rastra, surcado y la conformación de las camas de siembra. Posteriormente, sobre cada una de las camas se colocó una cinta de riego por goteo. La siembra se realizó el 10 de enero. La semilla se distribuyó manualmente sobre las dos hileras de cada cama utilizando 120 kg de semilla por ha. Al sembrar se fertilizaron las parcelas experimentales que contemplaron las dosis de 60,120 y 240 kg de N ha⁻¹, con el tratamiento base 60N-60P-00K, utilizando como fuentes de nitrógeno y fósforo: urea y superfosfato de calcio triple, y las parcelas sin N, únicamente se fertilizaron con fósforo (60 kg ha⁻¹). Finalmente, para completar la dosis de N en los tratamientos con 120 y 240 kg de N ha⁻¹ se aplicó urea durante el amacollamiento (18-02-2019), 60 y 180 kg de N ha⁻¹, respectivamente. A los 40 días de crecimiento (19/02/2019) se aplicó Cobdraz® (Tritosulfuron+Dicamba) a dosis de 200g de ia. por ha.

Durante la conducción del experimento se aplicaron 9 riegos, a intervalos de 7 a 10 días, para mantener el nivel de humedad en el suelo cercano a capacidad de campo.

3.4. Variables de estudio

3.4.1. Acumulación de materia seca

Conforme las plantas llegaron a encañe (Z31), embuche (Z45), antesis (Z65) y grano lechoso-masoso (Z85) se determinó la producción de materia seca en cada parcela experimental; se cortó una muestra aleatoria de plantas en 0.40 m² dentro de la parcela experimental útil. Inmediatamente, cada una de las muestras se llevaron al laboratorio donde se registró su peso fresco. Posteriormente se separaron tallos y hojas. Cada muestra se sometió a secado en una estufa con aire forzado a 60-65 °C por 72 horas y se registró por separado peso seco de hojas y tallos.

3.4.2. Área foliar

En cada una de las etapas de muestreo se determinó indirectamente el área foliar a partir de una muestra de 10 hojas. En cada hoja se estimó su área multiplicando su longitud por su ancho máximo (en cm) x 0.75; se secaron en la estufa y se registró su peso en g. Finalmente, el área foliar de cada muestra se obtuvo al multiplicar el área total en cm² de las 10 hojas por el peso seco de todas las hojas de la muestra y dividir el resultado entre el peso seco de las 10 hojas.

3.4.3. Análisis de crecimiento

Con los datos obtenidos de materia seca y área foliar se determinaron los índices de crecimiento aplicando las fórmulas descritas en el presente estudio, en el subcapítulo 2.6, Capítulo II.

3.4.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Para monitorear el estatus nutricional de las plantas, se registró el NDVI con la ayuda de un lector electrónico (GreenSeeker) el cual se desplazó sobre la cubierta de las dos camas centrales y se registró la lectura de NDVI que integró a toda la parcela. Durante el ciclo de crecimiento se realizaron nueve lecturas, desde amacollamiento hasta grano lechoso-masoso.

3.4.5. Contenido de clorofila (SPAD)

Con la ayuda de un medidor portátil minolta™ (Chlorophyll meter SPAD 502) se registraron las lecturas en unidades SPAD de una muestra de 20 hojas dentro de cada parcela experimental, dichas lecturas se realizaron durante encañe, embuche, antesis, y grano lechoso-masoso.

3.4.6. Contenido de nitrógeno

Las muestras se molieron en un molino de martillos y se tomó una submuestra de 5 g, la cual se molió en un molino ciclónico UDY para obtener un tamaño de partícula no mayor a 2 mm, se determinó el contenido de N por el método micro Kjeldahl, utilizando 200 mg de materia seca. Esta determinación se llevó a cabo en el Laboratorio de Ecofisiología de Cultivos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la U.A.E.M., usando un microdestilador Foss™.

3.4.7. Contenido de fibra

Con las muestras obtenidas en la etapa de grano lechoso-masoso se determinaron los contenidos de fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) con la técnica propuesta por Van Soest, para lo cual se utilizó el digestor de fibras ANKOM™.

3.4.8. Contenido de proteína

Para determinar el contenido de proteína obtenido en las diferentes etapas de corte se multiplicó su porcentaje de nitrógeno por 6.25 para obtener el porcentaje de proteína en base seca del forraje.

3.4.9 Determinación de la curva de dilución de nitrógeno

A partir de las medias obtenidas para la producción de materia seca y el contenido de nitrógeno registrado en las cuatro etapas fenológicas se determinó la curva de dilución de N para cada una de las dosis y variedades, utilizando un modelo de regresión potencial definido por:

$$\% N_c = aW^{-b}$$

% N_c = Porcentaje de nitrógeno crítico en la materia seca.

W = peso de materia seca en t ha⁻¹.

a = concentración de N, en %, para 1 t ha⁻¹ de materia seca.

b = coeficiente de regresión adimensional.

Con % N_c se calculó el Índice de Nutrición de Nitrógeno (INN) utilizando:

$$INN = \frac{\%N_c}{\%N_a}$$

Dónde: %N_c = porcentaje de nitrógeno crítico estimado en la curva de dilución de nitrógeno y %N_a = porcentaje de nitrógeno registrado en la materia seca.

3.5.- Análisis estadístico

3.5.1. Análisis de varianza

Para cada variable se hizo un análisis de varianza con base en:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_k + \beta_i + \gamma_j + \delta_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Dónde: Y_{ijk} = respuesta observada con la i-ésima dosis de nitrógeno, en la j-ésima variedad, y en la k-ésima repetición, μ = media general, μ_k = efecto del bloque k (k=1, 2, 3), μ_i = efecto de la dosis de nitrógeno i (i =1, 2, 3, 4), μ_j = efecto de la variedad j (j=1, 2, 3), μ_{ij} = efecto de la interacción dosis x variedad, μ_{ijk} = residual del modelo.

En el caso de la producción de forraje y materia seca el análisis de varianza se hizo con base en:

$$Y_{ijkl} = \mu + \mu_l + \mu_i + \mu_j + \mu_k + \mu_{ij} + \mu_{ik} + \mu_{jk} + \mu_{ijk} + \mu_{ijkl}$$

Dónde: Y_{ijkl} = respuesta observada con la i-ésima dosis de nitrógeno, en la j-ésima variedad, durante la k-ésima etapa de corte y en la repetición l, μ = media general, μ_l = efecto del bloque l (l=1, 2, 3), μ_i = efecto de la dosis de nitrógeno i (i =1, 2, 3, 4), μ_j = efecto de la variedad j (j=1, 2, 3), μ_k = efecto de la etapa de corte k (k=1,2,3,4), μ_{ij} = efecto de la interacción dosis de N x variedad, μ_{ik} = efecto de la interacción dosis de N x etapa de corte, μ_{jk} = efecto de la interacción variedad x etapa de corte, μ_{ijk} = efecto de la interacción dosis de N x variedad x etapa de corte μ_{ijkl} = residual del modelo.

3.5.2 Comparación de medias

Cuando los valores de F resultaron significativos (P < 0.05) se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa Honesta (Tukey) a un nivel de probabilidad del 0.05.

Ambos análisis estadísticos se llevaron a cabo con el Sistema para Análisis Estadístico (SAS, Versión 5.2)

3.5.3 Análisis de regresión

Para estudiar el efecto de la dosis de nitrógeno sobre algunas de las variables de estudio se realizaron análisis de regresión lineal y cuadrático. Dichos modelos y sus gráficas se realizaron con el programa Excel de Office, versión 365.

IV RESULTADOS

4.1. Rendimiento de forraje, producción de materia seca, índice de área foliar y contenido de nitrógeno

Los resultados que se muestran en el Cuadro 4 indican que entre bloques no hubo diferencias significativas ($P \geq 0.05$). Para etapa de corte se detectaron diferencias significativas ($p < 0.01$) en rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS) y contenido de nitrógeno (CN); en índice de área foliar (IAF) y nitrógeno extraído (NE) no hubo diferencias significativas. En el factor Variedad hubo diferencias significativas al 0.01 en RFV, RMS, IAF y al 0.05 para N. En cuanto al factor dosis de nitrógeno se detectaron diferencias significativas al 0.01 en todas las variables.

En etapa de corte x variedad no hubo efectos significativos en ninguna variable; sólo en etapa de corte x nitrógeno éstos lo fueron al 0.01 en RMS. Para variedad x nitrógeno se detectaron efectos significativos al 0.01 en CN y NE, y al 0.05 para RFV. Finalmente, para etapa de corte x variedad x nitrógeno no se encontraron efectos significativos en ninguna variable.

Cuadro 4. Valores de F de los análisis de varianza y su significancia estadística para rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS), índice de área foliar (IAF), contenido de nitrógeno (CN) y nitrógeno extraído (NE).

| Fuente de Variación | RFV | RMS | IAF | CN | NE |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Bloques | 0.14 ns | 0.38 ns | 1.04 ns | 14.93 ** | 15.31 ** |
| Etapas de corte (E) | 60.19 ** | 65.60 ** | 0.39 ns | 69.80 ** | 0.79 ns |
| Variedad (V) | 24.46 ** | 31.01 ** | 20.94 ** | 2.88 ns | 3.15 * |
| Nitrógeno (N) | 78.22 ** | 79.22 ** | 32.34 ** | 8.60 ** | 36.55 ** |
| E x V | 0.63 ns | 2.94 ns | 1.98 ns | 1.59 ns | 0.77 ns |
| E x N | 1.35 ns | 4.27 ** | 0.48 ns | 1.21 ns | 0.30 ns |
| V x N | 2.61 * | 1.61 ns | 0.81 ns | 8.26 ** | 5.66 ** |
| E x V x N | 0.90 ns | 0.98 ns | 1.05 ns | 0.41 ns | 0.23 ns |

ns= no significativo, *=significativo al 0.05, ** = significativo al 0.01

4.1.1 Efecto de la etapa de corte

En la comparación de medias que se presenta en el Cuadro 5 se observa que la etapa de corte tuvo un impacto muy marcado sobre el rendimiento del forraje. El rendimiento de forraje verde y de materia seca se incrementaron significativamente conforme avanzó el ciclo fenológico. De manera contraria, el contenido de nitrógeno (CN) tendió a disminuir conforme avanzaron las etapas de corte. Para IAF y el NE no se presentaron una respuesta definida a las etapas de corte sin que hubiera diferencias significativas entre sus valores medios.

Cuadro 5. Efecto de la etapa de corte (valores medios) sobre rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS), índice de área foliar (IAF), contenido de nitrógeno (CN) y nitrógeno extraído (NE).

| Etapa de corte | RFV (t ha ⁻¹) | RMS (t ha ⁻¹) | IAF | CN (%) | NE (kg N ha ⁻¹) |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------|--------|-----------|--------------------------------|
| Encañe | 10.64 d [†] | 2.13 d | 2.55 a | 1.91 a | 43.56 a |
| Embucho | 13.67 c | 2.96 c | 2.46 a | 1.26 b | 40.06 a |
| Antesis | 19.53 b | 4.96 b | 2.48 a | 0.92 c | 45.63 a |
| Grano lechoso- masoso | 23.61 a | 7.20 a | 2.33 a | 0.67 d | 47.21 a |
| DMSH (p=0.05) | 2.83 | 0.71 | 0.55 | 0.24 | 12.86 |

[†]Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente.

4.1.2 Respuesta de las variedades

Las variedades Karma y Obsidiana mostraron en promedio mayores rendimientos de forraje verde y materia seca, así como mayor IAF que Avemex. Las tres variedades mostraron el mismo comportamiento promedio para CN y solo Karma superó significativamente a Avemex para NE (Cuadro 6)

Cuadro 6. Efecto de la variedad (valores medios) sobre rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS), índice de área foliar (IAF), contenido de nitrógeno (CN) y nitrógeno extraído (NE).

| Variedad | RFV (t ha ⁻¹) | RMS (t ha ⁻¹) | IAF | CN (%) | NE (kg N ha ⁻¹) |
|---------------|------------------------------|------------------------------|--------|-----------|--------------------------------|
| Avemex | 13.00 b [†] | 3.37 b | 1.79 b | 1.25 a | 38.84 b |
| Obsidiana | 18.25 a | 4.70 a | 2.70 a | 1.24 a | 43.98 ab |
| Karma | 19.50 a | 4.82 a | 2.88 a | 1.08 a | 49.52 a |
| DMSH (p=0.05) | 2.21 | 0.56 | 0.43 | 0.19 | 10.13 |

[†]Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente entre sí.

4.1.3. Efecto de la dosis de nitrógeno

Conforme se incrementó la dosis de nitrógeno, RFV y NE aumentaron consistentemente, pero en RMS, IAF y CN no hubo un incremento significativo al pasar de 120 a 240 kg de N ha⁻¹. En todos los casos se obtuvieron los máximos promedios con la dosis de nitrógeno más alta (Cuadro 7).

Cuadro 7. Efecto de la dosis de nitrógeno (valores medios) sobre rendimiento de forraje verde (RFV), rendimiento de materia seca (RMS), índice de área foliar (IAF), contenido de nitrógeno (CN) y nitrógeno extraído (NE).

| Dosis de nitrógeno (kg ha ⁻¹) | RFV (t ha ⁻¹) | RMS (t ha ⁻¹) | IAF | CN (%) | NE (kg N ha ⁻¹) |
|--|------------------------------|------------------------------|--------|-----------|--------------------------------|
| 0 | 9.54 d [†] | 2.58 c | 1.68 b | 1.00 c | 22.83 c |
| 60 | 13.12 c | 3.57 b | 1.81 b | 1.08 bc | 31.03 c |
| 120 | 20.99 b | 5.31 a | 2.99 a | 1.25 ab | 53.90 b |
| 240 | 24.01 a | 5.74 a | 3.36 a | 1.43 a | 68.70 a |
| DMSH (p=0.05) | 2.83 | 0.71 | 0.55 | 0.24 | 12.86 |

[†]Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente.

4.2. Análisis de crecimiento

4.2.1 Efecto de la dosis de nitrógeno

En la Figura 4 se observa que la tasa de crecimiento de cultivo (TCC), la tasa de crecimiento relativo (TCR) y la tasa de asimilación neta (TAN) mostraron una respuesta cuadrática en función a la dosis de nitrógeno ($P < 0.01$), con coeficientes de determinación entre 0.90 y 0.98; la duración de área foliar (DAF) mostró una respuesta lineal positiva a la dosis de nitrógeno ($p < 0.05$, $R^2 = 0.85$). La TCC y TCR alcanzaron su máxima respuesta con 120 kg de N ha^{-1} , con un efecto decreciente en 240 kg N ha^{-1} , mientras que en TAN y DAF hubo un ligero incremento al pasar de 120 a 240 kg N ha^{-1} .

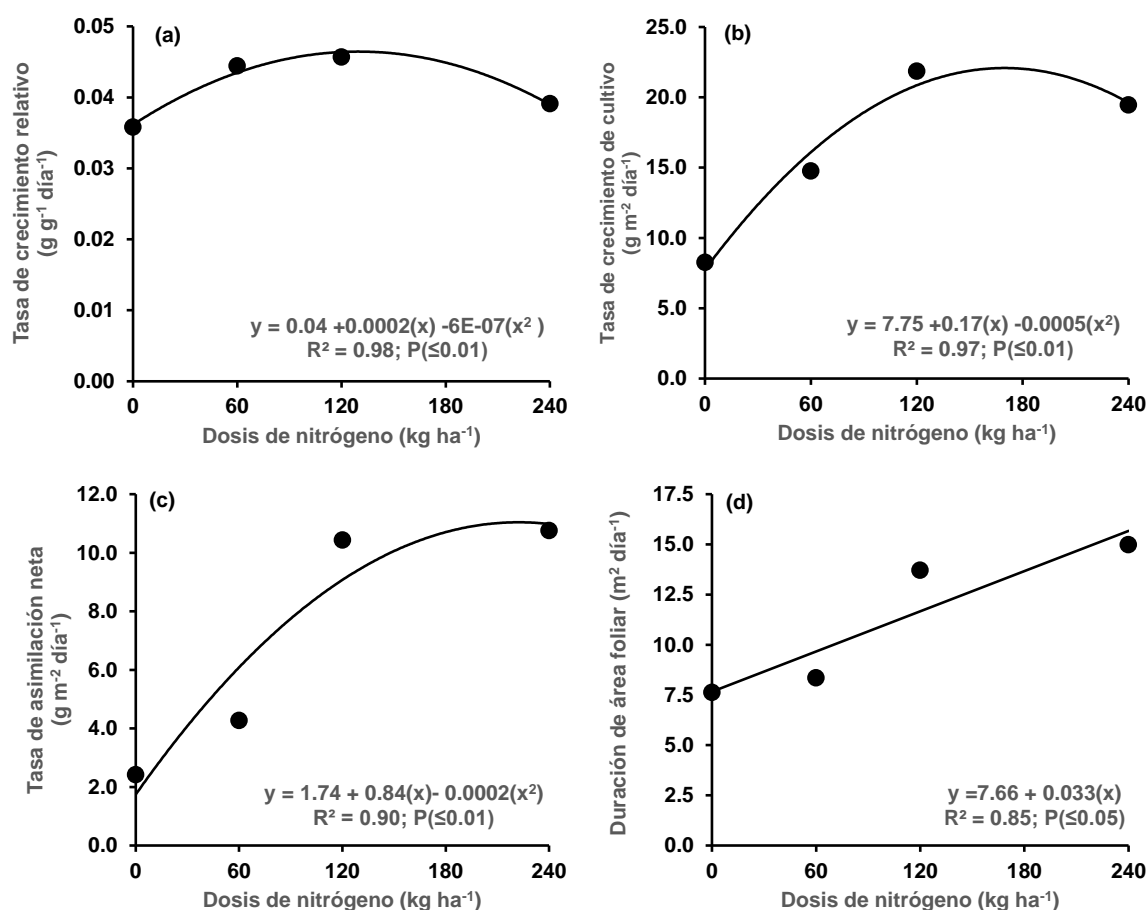


Figura 4 Respuesta promedio de la tasa de crecimiento del cultivo (a), tasa de crecimiento relativo (b), tasa de asimilación neta (c) y duración de área foliar (d) a cuatro dosis de nitrógeno en avena forrajera.

4.2.2 Respuesta de las variedades de avena a la dosis de N

Las variedades mostraron respuesta diferencial a la dosis de N en cada uno de los índices de crecimiento estudiados. En la mayoría de los casos se observó una respuesta positiva a la dosis de N pero la respuesta de cada una de las variedades se ajustó a diferentes modelos de regresión (Figura 5).

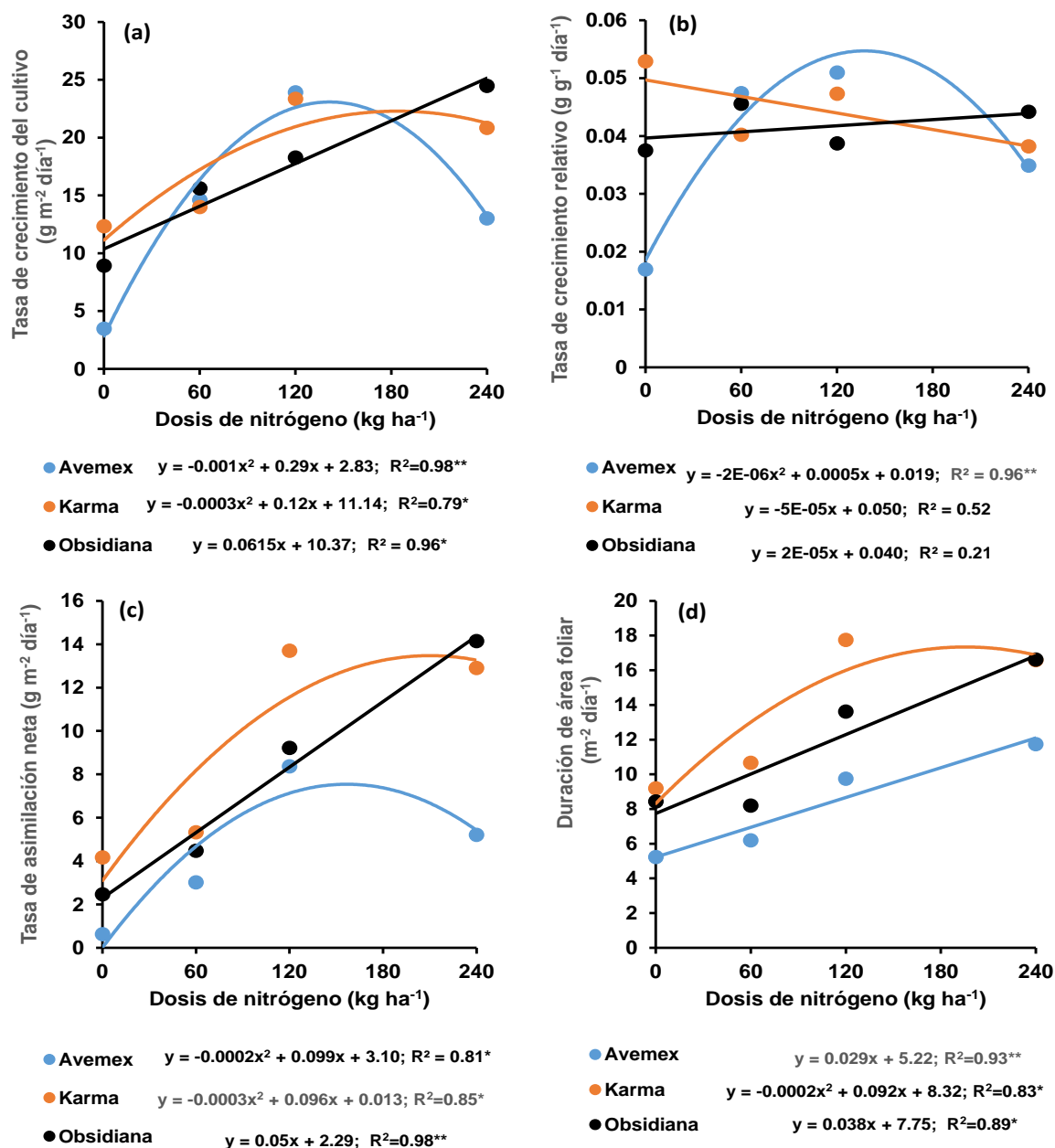


Figura 5. Respuesta de la tasa de crecimiento del cultivo(a), tasa de crecimiento relativo (b), tasa de asimilación neta (c) y duración de área foliar (d) a cuatro dosis de nitrógeno en tres variedades de avena forrajera.

En TCC, Karma y Avemex se ajustaron a un modelo cuadrático, y hubo una reducción al pasar de 120 a 240 kg N ha⁻¹; Obsidiana mostró una respuesta lineal positiva y significativa (P<0.01), alcanzando su máxima expresión en 240 kg N ha⁻¹ (Figura 5a).

La TCR no mostró relación significativa (p>0.05) con el N en Karma y Obsidiana, pero Avemex, cuya respuesta se ajustó a un modelo cuadrático (P<0.01), alcanzó su máxima respuesta en 120 kg N ha⁻¹ (Figura 5 b). La TAN se relacionó positivamente con la dosis de N; en Karma y Avemex mostró una respuesta cuadrática (P<0.05) y en Obsidiana se ajustó (P<0.01) a un modelo lineal (Figura 5c). En DAF, Avemex y Obsidiana mostraron una respuesta lineal positiva a la dosis de N, teniendo una mejor respuesta Obsidiana, mientras que Karma se ajustó a un modelo cuadrático superando a Avemex y Obsidiana en 120 kg N ha⁻¹ (Figura 5 d).

4.3. Cambios en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) durante el ciclo de crecimiento

En el Cuadro 8 se observa que para bloques no existieron diferencias significativas en ninguno de los muestreos. En el factor variedad se detectaron diferencias altamente significativas (p<0.01) en todos los muestreos, excepto a los 104 días. Para el factor nitrógeno se encontraron diferencias altamente significativas (p<0.01) en todos los muestreos. En ninguno de los muestreos se detectaron efectos significativos en Variedad x Dosis de N.

Cuadro 8. Valores de F de los análisis de varianza y su significancia estadística para índice NDVI registrados durante el ciclo de crecimiento.

| Fuente de variación | Días desde la siembra | | | | | |
|---------------------|-----------------------|----------|----------|----------|---------|----------|
| | 54 | 64 | 74 | 84 | 94 | 104 |
| Bloques | 0.73 ns | 0.72 ns | 1.49 ns | 0.96 ns | 0.15 ns | 0.12 ns |
| Variedad(V) | 12.31 ** | 11.29 ** | 15.36 ** | 38.42 ** | 7.60 ** | 0.87 ns |
| Nitrógeno(N) | 75.06 ** | 60.12 ** | 56.43 ** | 59.45 ** | 7.32 ** | 21.51 ** |
| V x N | 1.02 ns | 0.85 ns | 1.23 ns | 1.53 ns | 0.37 ns | 0.66 ns |
| C.V. (%) | 8.56 | 7.61 | 7.47 | 5.68 | 15.20 | 12.07 |

ns= no significativo, **=significativo al 0.01

4.3.1 Efecto de las variedades de avena sobre el índice de vegetación de diferencia normalizada a través del ciclo de crecimiento

En el Cuadro 9 se presenta la respuesta promedio del NDVI de cada una de las variedades a través de los muestreos realizados durante el ciclo de crecimiento. Obsidiana superó significativamente a las otras dos variedades hasta los 84 días de la siembra; a los 94 días sólo superó a Avemex y a los 104 días no hubo diferencias significativas entre las tres variedades. Las tres variedades presentaron una respuesta cuadrática a los días después de la siembra, alcanzando su máximo promedio a los 64 días de la siembra y a partir de ahí se registraron reducciones en sus valores al avanzar el ciclo de crecimiento (Figura 6).

Cuadro 9. Valores medios del NDVI en tres variedades de avena forrajera durante el ciclo de crecimiento.

| Variedad | Días después de la siembra | | | | | |
|-----------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 54 | 64 | 74 | 84 | 94 | 104 |
| Avemex | 0.53 b [†] | 0.58 b | 0.53 c | 0.50 c | 0.46 b | 0.40 a |
| Obsidiana | 0.63 a | 0.67 a | 0.64 a | 0.61 a | 0.58 a | 0.43 a |
| Karma | 0.57 b | 0.61 b | 0.58 b | 0.57 b | 0.55 a | 0.42 a |
| DMSH(5%) | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.08 | 0.05 |

[†] Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente.

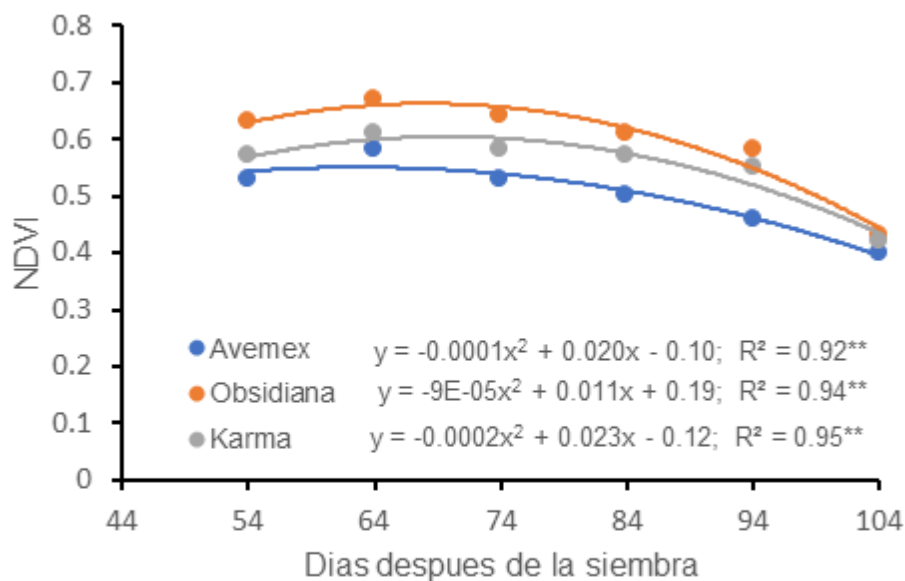


Figura 6. Respuesta del NDVI en tres variedades de avena a través de seis muestreos realizados durante el ciclo de crecimiento.

4.3.2. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre el índice de vegetación de diferencia normalizada a través del ciclo de crecimiento

La dosis de N tuvo un efecto positivo sobre el NDVI; al aumentar el N se incrementaron sus valores medios, alcanzando su máxima expresión a los 64 días de crecimiento (240 kg N ha^{-1}). Desde los 54 días de crecimiento los valores medios del NDVI en 120 y 240 kg N ha^{-1} superaron significativamente a los valores medios obtenidos con 0 y 60 kg N ha^{-1} (Cuadro 10). En las cuatro dosis de N los valores del NDVI tendieron a disminuir conforme avanzó el ciclo de crecimiento, siguiendo una tendencia cuadrática (Figura 6).

Cuadro 10. Efecto de la dosis de nitrógeno (valores medios) sobre NDVI durante el ciclo de crecimiento en avena forrajera

| Dosis de N(kg ha ⁻¹) | Días desde la siembra | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | 54 | 64 | 74 | 84 | 94 | 104 |
| 0 | 0.43 c [†] | 0.49 b | 0.47 b | 0.49 b | 0.47 b | 0.36 b |
| 60 | 0.49 c | 0.54 b | 0.52 b | 0.50 b | 0.47 b | 0.34 b |
| 120 | 0.67 b | 0.70 a | 0.65 a | 0.62 a | 0.57 ab | 0.48 a |
| 240 | 0.73 a | 0.75 a | 0.70 a | 0.64 a | 0.61 a | 0.49 a |
| DMSH | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.10 | 0.07 |

† Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren (p=0.05)

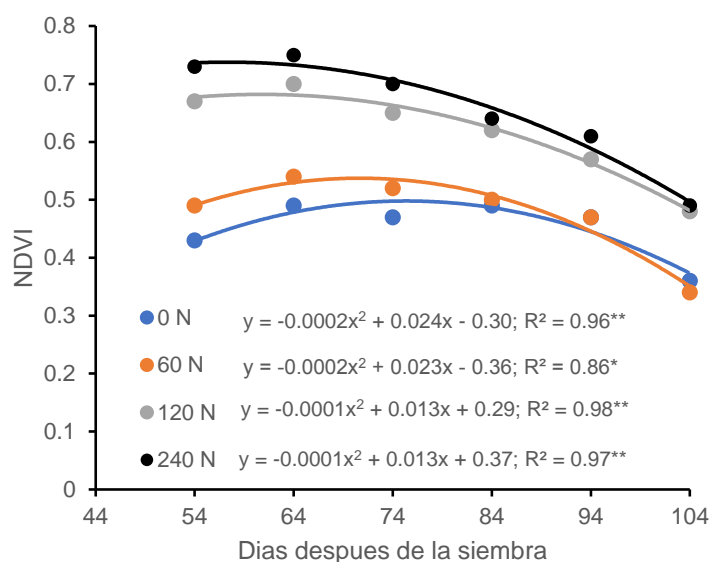


Figura 7. Respuesta promedio del NDVI a cuatro dosis de nitrógeno a través de seis muestreos realizados durante el ciclo de crecimiento en avena forrajera.

4.3.3. Superficie de respuesta del índice de vegetación de diferencia normalizada para cada una de las variedades

Al incrementarse el N aumentaron los valores del NDVI, pero al avanzar el ciclo de crecimiento éstos disminuyeron hasta presentar su mínima expresión a los 104 días de crecimiento, en 0 kg de N ha⁻¹ (Figura 8).

Los mejores patrones de respuesta los mostraron las variedades Karma y Obsidiana con valores de NDVI cercanos 0.75 durante el periodo de 54 a 74 días de crecimiento con las dosis de 120 a 240 kg N ha⁻¹, mientras que Avemex alcanzó valores máximos de NDVI cercanos a 0.60 únicamente con la dosis más alta de N durante el periodo de 54 a 64 días después de la siembra. La variedad Obsidiana mantuvo por más tiempo valores más altos de NDVI cuando no se aplicó N al suelo, alcanzando valores de NDVI cercanos a 0.40 a los 104 días de crecimiento, mientras que Avemex mostró valores de NDVI cercanos a 0.30 a partir de los 84 días de crecimiento con la dosis de 0 kg N ha⁻¹.

4.4 Cambios en el contenido de clorofila foliar durante las etapas de crecimiento

Para los valores SPAD no hubo diferencias significativas entre bloques. El factor variedad mostró diferencias significativas al 0.01 en antesis (ANT) y grano lechoso masoso (GLM) y al 0.05 en embuche (EMB); sin diferencias significativas para las primeras etapas de AMC y ENC. El factor nitrógeno tuvo un efecto marcado en el contenido de clorofila ya que en todas las etapas de corte hubo diferencias significativas ($p < 0.01$). La interacción Variedad x Nitrógeno no mostró efectos significativos en ninguna de las variables (Cuadro 11).

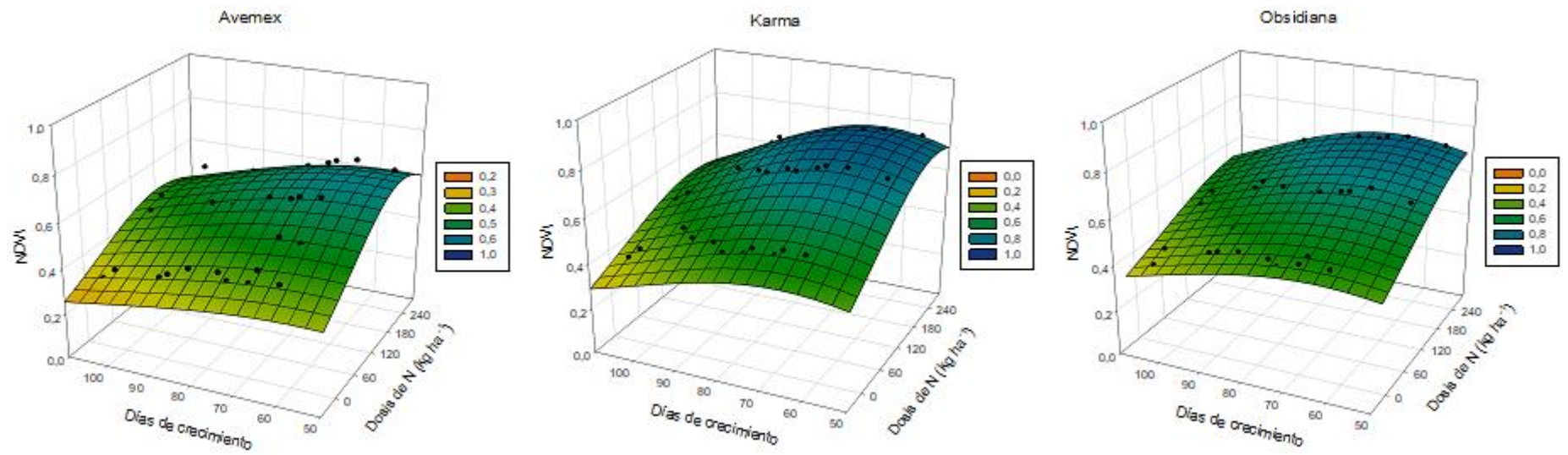


Figura 8. Superficies de respuesta del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en función a los días de crecimiento y dosis de nitrógeno en tres variedades de avena forrajera cultivadas en el valle de Toluca, México.

Cuadro 11. Valores de F de los análisis de varianza y su significancia estadística para el contenido de clorofila foliar (valores de SPAD) registrados en avena durante cinco etapas de crecimiento (AMC=amacollamiento, ENC=encañe, ANT=antesis, GLM=grano lechoso-masoso).

| Fuente de variación | Etapa de corte | | | | |
|---------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|
| | AMC | ENC | EMB | ANT | GLM |
| Bloques | 0.92 ns | 0.35 ns | 0.23 ns | 1.16 ns | 0.32 ns |
| Variedad(V) | 1.07 ns | 2.98 ns | 5.34 * | 11.01 ** | 13.47 ** |
| Nitrógeno(N) | 48.93 ** | 24.31 ** | 25.81 ** | 26.51 ** | 21.34 ** |
| V x N | 0.69 ns | 1.17 ns | 0.57 ns | 1.92 ns | 1.66 ns |
| C.V. (%) | 6.81 | 8.23 | 3.84 | 8.76 | 11.08 |

ns= no significativo, **=significativo al 0.01

4.4.1 Contenido de clorofila foliar en cada una de las etapas de crecimiento en las tres variedades de avena

Los valores de SPAD en las tres variedades fueron similares en amacollamiento y encañe, pero a partir de embuche Avemex superó a Karma y a Obsidiana en antesis y grano lechoso masoso. En general, Avemex mostró un comportamiento más estable a través de las cinco etapas de corte, y Karma y Obsidiana redujeron sus valores al avanzar el ciclo del cultivo (Cuadro 12).

Cuadro 12. Medias de contenido de clorofila foliar (valores de SPAD) para tres variedades de avena forrajera durante cinco etapas de corte (AMC=amacollamiento, ENC=encañe, ANT=antesis, GLM= grano lechoso-masoso).

| Variedad | Etapa de corte | | | | |
|-----------|----------------------|---------|----------|---------|---------|
| | AMC | ENC | EMB | ANT | GLM |
| Avemex | 45.73 a [†] | 45.23 a | 46.73 a | 46.19 a | 46.94 a |
| Karma | 45.65 a | 46.18 a | 43.78 ab | 41.84 b | 40.04 b |
| Obsidiana | 44.10 a | 42.64 a | 41.63 b | 39.14 b | 37.53 b |
| DMSH | 3.15 | 3.77 | 3.93 | 3.81 | 4.72 |

[†] Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren al 0.05

4.4.2 Efecto del nitrógeno sobre el contenido de clorofila foliar

El N tuvo un efecto muy marcado en esta variable en las diferentes etapas de corte. Conforme aumentó la dosis de N se incrementaron las unidades SPAD a partir de 120 kg N ha⁻¹. En 240 kg ha⁻¹ permaneció su efecto positivo hasta la etapa de GLM, superando significativamente a las otras dosis, y en 0 y 60 kg de N ha⁻¹ se presentaron los valores más bajos y no difirieron significativamente ambas medias a lo largo de las cinco etapas de corte.

Cuadro 13. Respuesta del contenido de clorofila foliar (unidades SPAD) a cuatro dosis de nitrógeno en avena durante cinco etapas de corte (AMC=amacollamiento, ENC=encañe, ANT=antesis, GLM=grano lechoso-masoso).

| Dosis de N (kg ha ⁻¹) | Etapa de corte | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|----------|
| | AMC | ENC | EMB | ANT | GLM |
| 0 | 38.22 b [†] | 39.84 b | 37.81 b | 36.38 c | 37.38 bc |
| 60 | 39.89 b | 39.09 b | 39.51 b | 38.22 c | 35.53 c |
| 120 | 49.89 a | 49.50 a | 47.28 a | 44.61 b | 41.72 b |
| 240 | 52.64 a | 50.30 a | 51.58 a | 50.36 a | 51.39 a |
| DMSH | 4.02 | 4.81 | 5.02 | 4.86 | 6.02 |

[†] Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren al 0.05

4.4 Curva de dilución de nitrógeno e índice de nutrición de nitrógeno

En la Figura 9 se presentan las curvas de dilución de nitrógeno estimadas para cada una de las tres variedades con el modelo $Y = aX^{-b}$. En éste, Y es la estimación del nitrógeno crítico, expresado en porcentaje, X es el rendimiento de materia seca (t ha⁻¹), a estima el contenido de nitrógeno requerido para producir 1.0 t de materia seca por ha y el coeficiente b determina la relación de descenso de la concentración de N cuando se incrementa la biomasa del cultivo.

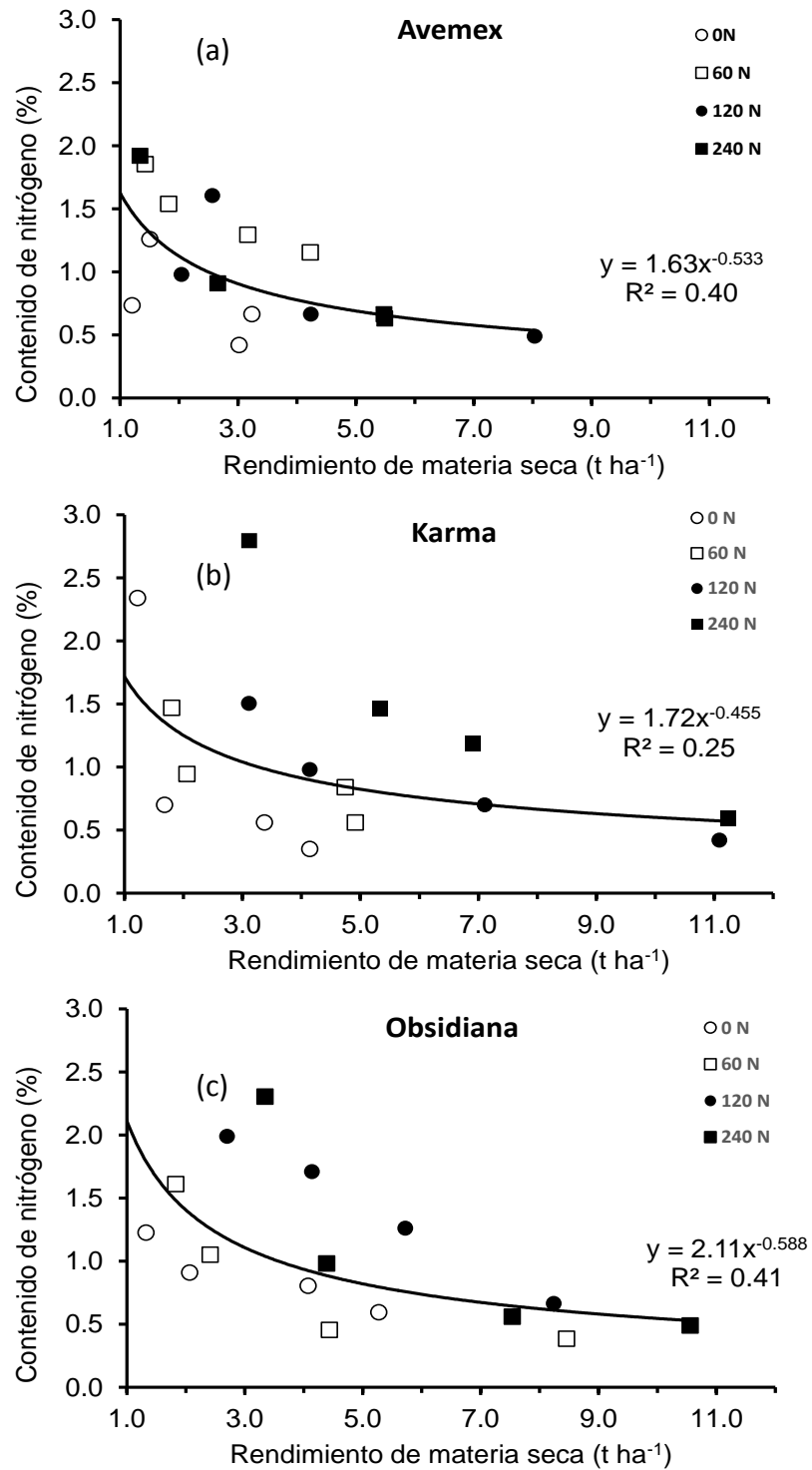


Figura 9. Curvas de dilución de nitrógeno estimadas a partir del rendimiento de materia seca y el contenido de nitrógeno para tres variedades de avena forrajera cultivadas en el valle de Toluca, México.

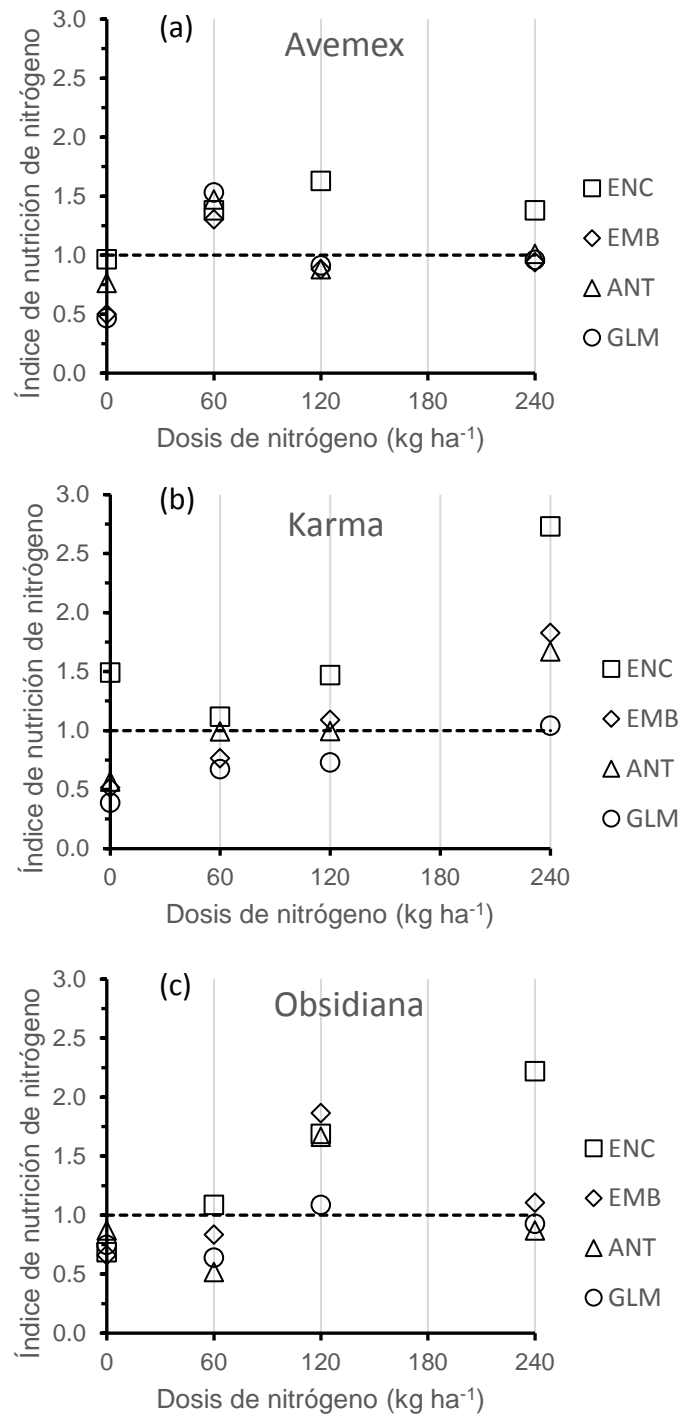


Figura 10. Relación entre la dosis de nitrógeno y índice de nutrición de nitrógeno estimado en tres etapas de corte para tres variedades de avena forrajera.

En esta misma figura se observa que en las tres variedades se presentó un efecto de dilución en el contenido de N al aumentar el rendimiento de materia seca, pero también presentaron distintos patrones de respuesta y diferentes grados de ajuste (R^2) a la regresión. En Karma y Obsidiana a 120 y 240 kg N ha⁻¹ hubo concentraciones de N por arriba o muy cerca de la curva de dilución de nitrógeno, y a 0 y 60 kg N ha⁻¹ éstas estuvieron por debajo de la curva de dilución de nitrógeno (Figuras 9b y 9c). En Avemex, el contenido de N observado en 60 kg N ha⁻¹ estuvo por arriba del N crítico estimado en la curva de dilución de N y de la mayoría de los tratamientos con las dosis más altas de N (120 y 240 kg ha⁻¹) mostraron concentraciones de N cercanas a la curva teórica de dilución de N y, en dos casos, por arriba de ésta (Figura 9a).

En la Figura 10 se presenta la respuesta del INN para cada variedad. En ésta se observa con cuales dosis y en qué etapa de corte se obtuvieron valores por arriba o por abajo del valor crítico (1.0), representado por la línea punteada. Para Avemex el INN no tuvo una respuesta definida en ninguna de las etapas de corte. Para Karma se observó que a medida que se incrementó la dosis de N el INN tendió a incrementarse en cada una de las etapas de corte, observándose los valores más altos en las etapas de corte iniciales en 120 y 240 kg N ha⁻¹. En Obsidiana únicamente se observó un incremento lineal en el INN a la dosis de N en la etapa de encañe, mientras que en las otras tres etapas de corte los máximos valores se observaron en 120 kg N ha⁻¹ y se mantuvieron cercanos a 1 en 240 kg N ha⁻¹.

La Figura 11 muestra la relación que existió entre el INN y el rendimiento potencial de materia seca estimado en cada una de las variedades con los rendimientos que alcanzaron en cada una de las etapas de corte. En esta figura se aprecian los cambios en el rendimiento potencial estimados a partir de un modelo bilineal con fase estacionaria. Aplicando dicho modelo se pudo

determinar que para Avemex se alcanzó el máximo potencial de rendimiento con un INN equivalente a 0.85 y rendimiento potencial teórico de 0.75.

La variedad Karma presentó una respuesta más definida al INN, observándose que al utilizar las dosis de N más altas (120 y 240 kg N ha⁻¹) los rendimientos potenciales fueron iguales o muy cercanos a 1. De acuerdo con el modelo bilineal el INN en donde se estimó el máximo rendimiento potencial fue equivalente a 0.96 con un rendimiento potencial teórico de 0.84 (Figura 11 b).

La variedad Obsidiana tuvo un comportamiento similar al de Karma, con rendimientos potenciales cercanos a 1.0 en las dosis altas de N. De acuerdo con los parámetros estimados en el modelo de regresión bilineal el INN con el que se alcanzó el rendimiento potencial fue muy cercano a 1.0 (0.98), con un rendimiento potencial máximo estimado de 0.84 (Figura 11c).

En la Figura 12 se presentan las relaciones observadas entre los valores del INN estimados en las diferentes etapas de corte. En esta Figura se aprecia claramente que sólo en el caso de la relación entre el INN estimado en embuche y el INN estimado en antesis se acercaron a 1:1. Con excepción de las relaciones entre el INN estimado en la etapa de encañe y el INN estimado en antesis, y entre las etapas de encañe y grano lechoso masoso, las relaciones entre los INN estimados en las etapas iniciales se relacionaron positiva y significativamente con las etapas posteriores.

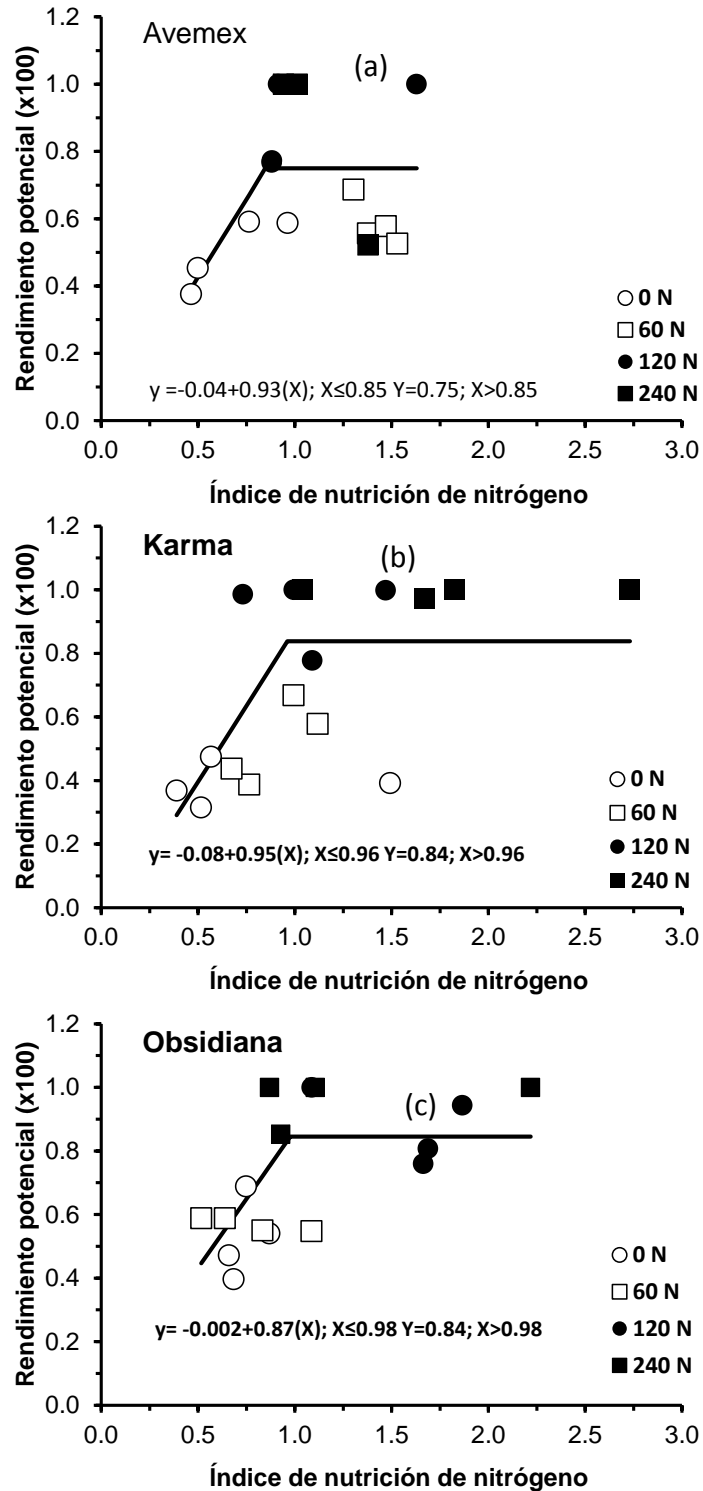


Figura 11. Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno y el rendimiento potencial de materia seca en tres variedades forrajeras de avena cultivadas en el valle de Toluca, México.

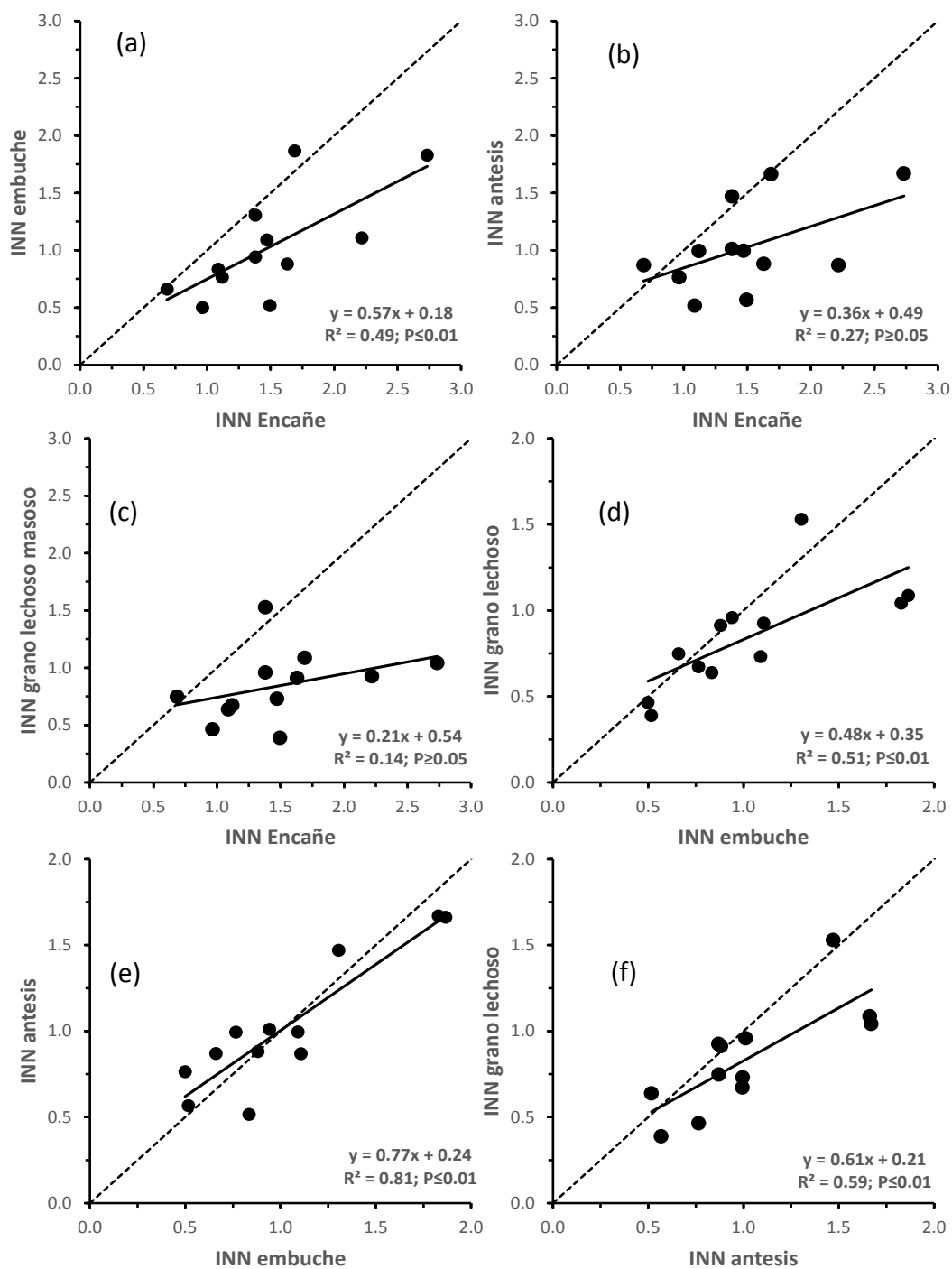


Figura 12. Relación entre los índices de nutrición de nitrógeno (INN) entre las diferentes etapas de corte en avena forrajera.

V DISCUSIÓN

Para alcanzar altos niveles de producción en los cultivos forrajeros es necesario que exista suficiente nitrógeno disponible en el suelo desde las primeras etapas de crecimiento. Esta situación permite lograr mayor cobertura y aumentar la eficiencia en el uso de la radiación, ya sea a través de mayor índice de área foliar o elevando la tasa de fotosíntesis. Sin embargo, es importante considerar que un exceso en la dosis de fertilización nitrogenada puede acarrear impactos negativos sobre el medio ambiente y elevar los costos del cultivo. Por lo tanto, si se desea elevar los rendimientos de manera sostenible es necesario identificar los niveles óptimos del estado nutricional del cultivo.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo mostraron efectos muy marcados de la fertilización nitrogenada sobre la expresión de los principales atributos relacionados con el crecimiento y con la generación de materia seca, existiendo también efectos significativos entre las variedades y en menor grado para la interacción Variedad x Nitrógeno. Como se esperaba, al aumentar la dosis de N y al avanzar el ciclo del cultivo se obtuvo mayor producción de forraje verde y/o de materia seca, mayor contenido de N en la parte aérea de las plantas y mayor cantidad de N extraído del suelo, obteniéndose los niveles de producción más altos en la etapa de grano lechoso-masoso, con rendimientos cercanos a 23.6 y 7.2 t ha⁻¹, respectivamente. Estos resultados son similares a los registrados en otros trabajos realizados en México, donde se muestra que en esta etapa se alcanzan los mayores niveles de producción de forraje en avena (Espitia *et al.*, 2012; Garam *et al.* 2007).

Las variedades Obsidiana y Karma sobresalieron en producción de forraje verde (18.25 y 19.50 t ha⁻¹), rendimiento de materia seca (4.7 y 4.82 t ha⁻¹) y nitrógeno extraído (43.98 y 49.52 k ha⁻¹), además mantuvieron mayor índice de área foliar (2.7 y 2.88) que Avemex. Esta última presentó escaso vigor en la etapa de emergencia, teniendo un crecimiento más lento y menor cobertura del suelo.

El incremento en la dosis de fertilización hasta 120 kg N ha⁻¹ se vio reflejado en mayor tasa de crecimiento del cultivo (TCC), tasa de crecimiento relativo (TCR),

tasa de asimilación neta (TAN) y duración de área foliar (DAF). Sin embargo, al subir la dosis a 240 kg ha⁻¹ se observó un efecto detrimental del N, lo cual indica que al sobrepasar los requerimientos de este elemento se genera un crecimiento excesivo del área foliar y mayor competencia entre las plantas por luz, reduciéndose así su eficiencia fotosintética. Sin embargo, los resultados que se presentan en la Figura 5 muestran que las variedades tuvieron un comportamiento diferencial, resaltando la variedad Obsidiana por presentar una respuesta lineal positiva a la dosis de N en TCC, TAN y DAF, mientras que Karma mostró una tendencia cuadrática con una reducción en estos mismos índices de crecimiento al pasar de 120 a 240 kg N ha⁻¹. Por otra parte, Avemex de nueva cuenta exhibió una menor respuesta a la dosis de N, lo que demuestra que algunas variedades pueden tener mayores ventajas adaptativas ante incrementos en la disponibilidad de N. Estos hechos coinciden con los observados por otros autores (Ordoñez *et. al.*, 2013), quienes señalaron que un cultivo expresa su potencial a una cierta dosis de N y si la dosis supera cierto límite no aprovecha de manera eficiente el N disponible.

Para conocer el estatus nutricional de los cultivos se puede recurrir a métodos indirectos asociados con la cobertura de las plantas y la pigmentación (verdor) de las hojas, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y los valores de SPAD (Soil Plant Analysis Development) asociados al contenido de clorofila en las hojas. En el presente trabajo, el monitoreo que se realizó durante la mayor parte del ciclo de crecimiento del cultivo, mediante el registro periódico de los valores de NDVI y SPAD, permitió identificar las variaciones en el estatus nutricional de las variedades ante cambios en la disponibilidad de N y el avance en las etapas del cultivo. De nueva cuenta se pudieron constatar diferencias significativas entre las variedades y dosis de N conforme avanzó el ciclo vegetativo del cultivo, sobresaliendo la variedad Obsidiana por mostrar mayores valores de NDVI que Avemex y Karma (Cuadro 9, Figura 6). La dosis de N tuvo una influencia directa sobre los valores de NDVI, observándose consistentemente los menores promedios con las dosis más bajas de N (0 y 60 kg N ha⁻¹) y los mayores promedios con las dosis más altas (120 y 240 kg N ha⁻¹).

1) (Cuadro 11, Figura 7). Las superficies de respuesta que se presentan en la Figura 8 permitieron describir el comportamiento de las variedades ante los incrementos en la dosis de N y el avance en las diferentes etapas de crecimiento del cultivo. Obsidiana y Karma se caracterizaron por presentar mayores valores de NDVI conforme aumentó la dosis de N, manteniendo esa superioridad durante mayor tiempo que Avemex, lo que demuestra que dichas variedades alcanzaron mayor cobertura ante un mayor suministro de N. Por lo que se refiere a los valores de SPAD, Avemex mostró un mejor comportamiento que Obsidiana y Karma sobre todo en las últimas etapas de corte (antes de la antesis y grano lechoso-masoso). Esta discrepancia entre los valores de NDVI y SPAD se atribuye al hecho de que la variedad Avemex, al presentar menor índice de área foliar (Cuadro 6), muy probablemente presentó mayor concentración de clorofila por unidad de área foliar. Tal y como se ha reportado en otros trabajos (Ziadi *et al.*, 2008; Errecart *et al.*, 2012), el aumento en la dosis de N se vio reflejado en un incremento de los valores de SPAD (Cuadro 13), lo cual es un claro indicativo de que éste puede ser un atributo sucedáneo para saber si las plantas presentan deficiencias de nitrógeno a lo largo del ciclo del cultivo.

El N es un nutriente esencial cuya demanda crece en la medida en que el mejoramiento genético ha elevado el potencial de rendimiento de los cultivos. Por lo tanto, la fertilización nitrogenada determina en gran medida la producción de biomasa y el rendimiento, sobre todo en los cereales (Sinclair y Horie, 1989; Salvagiotti *et al.*, 2009). Esto se debe principalmente a una buena respuesta adaptativa a las dosis de N y mayor resistencia a las heladas, plagas y enfermedades como es el caso de las variedades de avena para Valles Altos.

Las herramientas de diagnóstico para determinar deficiencias de N en las plantas pueden basarse en el concepto de curvas de dilución que describen la reducción en la concentración de N ante los incrementos en la producción de materia seca. Como se comentó anteriormente, el N es esencial para el crecimiento de las plantas y es clave para aumentar el rendimiento. Sin embargo, la concentración de N crítico no es un objetivo en sí mismo a seguir durante el crecimiento del

cultivo, sino que es una referencia fundamental en cualquier etapa de crecimiento, que permite determinar si la nutrición nitrogenada de los cultivos es óptima o subóptima con respecto a la tasa de crecimiento del cultivo (Gastal y Lemarie, 2002). De esta forma, las curvas de dilución de N separan situaciones en las que la concentración de este elemento es limitante para la producción de biomasa del cultivo de situaciones en las que se encuentra en exceso y no se logra un incremento adicional de biomasa por unidad de N aplicado. En el presente trabajo la concentración de nitrógeno en la biomasa de la parte aérea de las plantas disminuyó conforme avanzó el crecimiento, y una mayor dosis de N en general resultó en una mayor concentración de N en la planta. El descenso en concentración de N con el tiempo, o con el avance hacia la madurez, se ha reportado para otros cultivos como maíz (*Zea mays*) (Plénet y Lemaire, 2000; Ziadi *et al.*, 2008b), papa (*Solanum tuberosum*) (Bélanger *et al.*, 2001), pasto "Timothy" (*Phleum pratense*) (Bélanger y Richards, 1997, 1999) y trigo (*Triticum spp*) (Justes *et al.*, 1994).

Las curvas de dilución de nitrógeno de la Figura 8 muestran que las variedades difirieron en su patrón de respuesta en el contenido de N ante las variaciones en la producción de biomasa. La variedad Obsidiana mostró el mayor requerimiento de N para producir una tonelada de materia seca y mayor tasa de reducción en el contenido de N conforme aumentó la producción de biomasa ($Y=2.11(X)^{-0.588}$), mientras que Avemex mostró menor requerimiento de N para producir una tonelada de materia seca y menor tasa de dilución de N ($Y=1.63(X)^{-0.533}$). Las curvas de dilución permitieron identificar con claridad que cuando no se suministró nitrógeno al cultivo o se utilizó la dosis más baja (60 kg N ha^{-1}) el índice de nutrición de nitrógeno (INN) estuvo por abajo del óptimo ($\text{INN}<1$), mientras que con la dosis más alta (240 kg N ha^{-1}) se mantuvo en una condición supraóptima ($\text{INN}>1$) o cercana a la óptima ($\text{INN}=1$), sobre todo en las variedades Karma y Obsidiana, mientras que Avemex, al presentar menor potencial de rendimiento de materia seca, mantuvo INN supraóptimos en 60 kg N ha^{-1} (Figura 10).

El diagnóstico *a priori* del estado nutricional de N consiste en la detección temprana de deficiencias de N de la planta para determinar si existe o no la necesidad de suministrar N en forma de fertilizante. Otra aplicación podría ser un diagnóstico *a posteriori* dirigido a la detección de factores limitantes para cultivos en ensayos experimentales o campos en producción. De esta forma, la deficiencia puede basarse en la definición de una concentración crítica de N, es decir, la concentración mínima de N requerida para alcanzar la tasa de crecimiento máxima (Ulrich, 1952).

De acuerdo con lo anterior, el máximo rendimiento potencial de materia seca se obtendría cuando el INN fuera mayor o igual a 1. En el presente trabajo, el rendimiento potencial se incrementó de manera lineal conforme aumentó el INN hasta un punto en donde se alcanzó la fase estacionaria, existiendo diferencias entre las variedades en el punto de inflexión donde termina la respuesta lineal (Figura 11), observándose que para Obsidiana y Karma el punto de inflexión se alcanzó cuando el INN fue cercano a 1 (INN =0.96 y 0.98, respectivamente), mientras que en Avemex dicho punto de inflexión se presentó con un INN=0.85, lo que lleva a concluir que Obsidiana y Karma son dos variedades que demandan mayores concentraciones de N para alcanzar su rendimiento potencial.

La detección de deficiencias de N en etapas tempranas podría resultar de gran utilidad para tratar de corregirlas con aplicaciones de fertilizante en etapas subsecuentes. Cuando se relacionaron los valores de INN obtenidos entre etapas de corte subsecuentes (Figura 12) se observó que las relaciones que tuvieron mayor poder predictivo y se dieron entre los INN estimados en las etapas de embuche y antesis ($R^2=0.81$) y entre los INN estimados en antesis y grano lechoso masoso ($R^2=0.59$). Esto sugiere que el momento más apropiado para corregir una posible deficiencia de N en avena para la producción de forraje sería justo cuando inicia la elongación de los tallos o está por emerger la panícula.

El presente trabajo constituye una primera aproximación sobre el estudio del papel que juega el nitrógeno en el crecimiento y en la generación del rendimiento de materia seca en variedades de avena forrajera para Valles Altos. Los

resultados obtenidos indican que una mayor disponibilidad de N favorece, dentro de ciertos límites, a los principales índices de crecimiento pero no necesariamente se ve reflejada en mayor producción de forraje. Las curvas de dilución de N obtenidas parecen indicar que cada variedad tiene una respuesta específica y que pueden constituir una herramienta bastante útil para corregir alguna deficiencia de N en etapas tempranas. Sin embargo, es necesario conducir más experimentos para explorar la respuesta conjunta de originan otros factores de manejo, como fecha de siembra, disponibilidad de agua, densidad de siembra y dosis de otros macroelementos, como fósforo y potasio.

VI CONCLUSIONES

Con base a las condiciones en que se desarrolló el trabajo experimental, la metodología aplicada y los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- La dosis de nitrógeno modificó significativamente el crecimiento y la generación de materia seca en las tres variedades de avena a través del ciclo vegetativo, registrándose los máximos rendimientos de materia seca con 120 y 240 kg N ha⁻¹, en la etapa de grano lechoso masoso.
- Las variedades Karma y Obsidiana mostraron mayor respuesta a la dosis de N; en ambas se favorecieron rendimiento de forraje verde, materia seca e índice de área foliar.
- Las tasas de crecimiento del cultivo, de crecimiento relativo y de asimilación neta mostraron una respuesta cuadrática a la dosis de nitrógeno, alcanzando su máxima respuesta en 120 kg N ha⁻¹, mientras que la duración del área foliar tuvo una respuesta lineal a la dosis de N hasta 240 kg N ha⁻¹. Las variedades presentaron un comportamiento diferencial a la dosis de N en estos mismos índices de crecimiento, observándose mejores patrones de respuesta en Obsidiana y Karma.
- El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) permitió monitorear eficientemente el estatus nutricional del cultivo. Conforme aumentó la dosis de N se incrementaron los valores de este índice, y disminuyeron conforme avanzó el periodo vegetativo.
- Las superficies de respuesta estimadas con los valores del NDVI ante las variaciones en la dosis de N y los días de crecimiento, mostraron que

Obsidiana y Karma mantuvieron mayor cobertura con hojas verdes y vivas durante mayor tiempo que Avemex.

- El contenido de clorofila foliar medido en unidades SPAD mostró incrementos significativos en 120 y 240 kg de N a través de las cinco etapas del ciclo vegetativo monitoreadas, sobresaliendo Avemex con valores significativamente mayores que Obsidiana y Karma cuando se consideraron las etapas de antesis y grano lechoso masoso.
- Las variedades mostraron diferentes patrones de respuesta en el contenido de N en función de la materia seca producida. Obsidiana mostró mayor tasa de dilución de N y mayor requerimiento de N para producir 1 t ha⁻¹ de materia seca.
- En 120 y 240 kg N ha⁻¹, Karma y Obsidiana mostraron concentraciones de N por arriba o muy cerca de los valores críticos estimados con la curva de dilución de nitrógeno, mientras que en 0 y 60 kg N ha⁻¹ mostraron concentraciones por debajo de la curva de dilución de N. En Avemex el contenido de N en 60 kg N ha⁻¹ estuvo por arriba del contenido de N crítico estimado. Los tratamientos con las dosis más altas de N mostraron resultados cercanos a la curva teórica de dilución del nitrógeno.
- El índice de nutrición de nitrógeno en las etapas de corte mostró su mayor valor en Karma y Obsidiana: en Karma. en las primeras etapas de corte (encañe y embuche) sometidos a dosis más altas de nitrógeno, y Obsidiana mostró incremento en las etapas de embuche, antesis y grano lechoso masoso con valores cercanos a 1 en 240 kg N ha⁻¹. Avemex no tuvo una respuesta clara en cada una de las etapas de corte.

- Las variedades Karma y Obsidiana presentaron mayor rendimiento potencial cercanos a 1.0 en 120 y 240 kg N ha⁻¹ y en las etapas de embuche y antesis mostraron un valor cercano.
- Las curvas de dilución, el registro del índice de vegetación de diferencia normalizada y el contenido de clorofila en unidades SPAD pueden utilizarse como una herramienta útil para el diagnóstico del estatus nutricional referido a nitrógeno en avena forrajera a través de las etapas del periodo vegetativo.

VII BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alessandri, D (2009).** *Seminario sobre fertilización nitrogenada en pasturas.* Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Pasturas. Recuperado el 12 de septiembre de 2019 de <http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos/PASTURAS%20CRS/Seminarios%20009/Texto%20-%20Fertilizacion%20Nitrogenada%20en%20Pasturas.pdf>.
- Apuntes del Curso Ecofisiología de los Cultivos (2017A).** Facultad de Ciencias Agrícolas de la U.A.E.Mex, Licenciatura de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista.
- Apuntes del Curso Producción Pecuaria (2019).** Facultad de Ciencias Agrícolas de la U.A.E.Mex, Licenciatura de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista.
- Bélanger, G., and J.E. Richards (1997).** Growth analysis of timothy grown with varying N nutrition. *Can. J. Plant Sci.* 77:373–380.
- Bélanger, G., and J.E. Richards (1999).** Relationship between P and N concentrations in timothy. *Can. J. Plant Sci.* 79:65–70.
- Bélanger, G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn, and N. Ziadi (2001).** Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in Eastern Canada. *Am. J. Potato Res.* 78:355–364.
- Errecarta P.M.,*,M. G. Agnusdeia, F.A. Lattanzib, M. A. Marinoc (2012)** Leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings as predictors of tall fescue nitrogen nutrition status. *Field Crops Research.* 129: 46-58.
- Espitia, R. E., H.E. Villaseñor M., R. Tovar G., M. de la O, A. Limón O. (2012).** Momento óptimo de corte para rendimiento y calidad de forraje de variedades de avena forrajera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 3: 771-783.

Espitia, R.E., H.E. Villaseñor M., J. Huerta E., L. Osorio A.,(2008.) Obsidiana: Nueva variedad de avena para producción de grano y forraje. Folleto Técnico 28. INIFAP-CIRCE-Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Edo. De México. 19 pp.

FAO (2017). FAOSTAT CULTIVOS. Sitio web: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>.

Ferreira., G Ernst, O (2014). Diagnóstico del estado nutricional del cultivo de colza (*Brassica napus*) en base a curvas de dilución de nitrógeno y azufre. Agrociencia Uruguay.

Financiera Rural. (2010). Monografía de la avena y semilla de avena para siembra. Recuperado el 18 de diciembre del 2019 de: [http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Monografias/Monograf%C3%ADa%20Avena%20\(oct%2010\)%20vf.pdf](http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Monografias/Monograf%C3%ADa%20Avena%20(oct%2010)%20vf.pdf).

Fontanetto H., Keller O, García F., Ciampitti I. (2006). Fertilización nitrogenada en avena. INTA. Buenos Aires Argentina. Recuperado el 20 de diciembre del 2019 de: [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/F5322BC9A2200D108525799500775AB1/\\$FILE/6.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/F5322BC9A2200D108525799500775AB1/$FILE/6.pdf)

Frigerio, K.L., Blanco, E.M., Privitello, J.M.L., Panza, A.A., Frasinelli, C.A (2016). Curva de dilución e índice de nutrición nitrogenada para *Digitaria eriantha* cv. Irene bajo diferentes regímenes de agua y nitrógeno. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina.

Gastal, F. and Lemaire, G. (2002). N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. J. Exp. Bot. 53:789-799.

Gutiérrez., M., Cadet, E., Rodríguez, W (2011). El Greenseeker™ y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana*. Recuperado el 28 de septiembre de 2019 de http://www.mag.go.cr/rev_meso/v22n2_397.pdf.

- Juárez, J., Bolaños, E. D., Vargas, L.M., Medina, S., Martínez; Hernández, P.A (2011).** Curvas de dilución de la proteína en genotipos del pasto *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick. Revista Cubana de Ciencia Agrícola, Instituto de Ciencia Animal. La Habana, Cuba.
- Jurado G. P., Lara M. C.; (2014);** Paquete Tecnológico Para La Producción De Avena Forrajera En Chihuahua; INIFAP; Recuperado el 19 de diciembre de:
http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/4307/010208104500064509_CIRNOC.pdf;sequence=1
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M, Machet, J.M. and Thelier-Huche, L. (1994).** Determination of critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. Ann. Bot. 4:397-407.
- Mendoza, M., González, G., Aguilar, A., Etchevers, J. (1998).** Estimación de la concentración de nitrógeno y Clorofila en tomate mediante un medidor portátil de Clorofila. Terra latinoamericana. Recuperado el 28 de Septiembre de 2019 de <https://www.chapingo.mx/terra/contenido/16/2/art135-141.pdf>
- Montaño, M.C. Hernandez R.A., Martinez R.A. (2017).** Producción y contenido nutrimental en avena forrajera fertilizada con fuentes químicas y orgánicas. Revista Fitotecnia Mexicana, vol. 40, núm. 3. Recuperado el 15 de diciembre del 2019 de: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/610/61050549007/html/index.html>
- Ordoñez S., Dominguez D., Salmeron J., Villalobos G., Ortega J. (2013).** Producción y calidad del forraje de variedades de Avena en función del sistema de siembra y de la etapa de madurez al corte. Fitotecnia Mexicana Vol. 6, Nº 2, pp. 345-403.
- Plénet, D., and G. Lemaire. (1999).** Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops: Determination of critical N concentration. Plant Soil 216:65–82.

SAGARPA. (2014). (Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación). Recuperado el 18 de Diciembre del 2019 de: <http://w4.siap.sagarpa.gob.mx/AppEstado/monografias/Forrajes/AvenaFo.html>.

SEDAGRO (2017). Avena Forrajera en Verde ICAMEX. Sitio web: <http://sedagro.edomex.gob.mx/>

Sinclair, T.R., y T. Horie. (1989). Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science*, 29:90-98.

Squella N, Fernando & Ormeño N, Juan (2007). La avena como cultivo forrajero. San Fernando: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR34674.pdf>

Ulrich, A. (1952). Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 3:207–228.

Villaseñor H.E, Limon O.A, Huerta E.J, Rodriguez G.M.G, Espita R.E, Leyma M.S.G. (2008). El cultivo de Avena en el Estado de Mexico. INIFAP. Chapingo, Estado de Mexico.

Ziadi N., M., Brassard, G.,Bélanger, A, Claessens, N., Tremblay,A., N. Cambouris, M. C. Nolin, and L. Parent (2008). Chlorophyll Measurements and Nitrogen Nutrition Index for the Evaluation of Corn Nitrogen Status. *Agronomy Journal.* 100(5): 1264-1273.