

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS



**FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL CULTIVO DE SORGO
[*Sorghum bicolor* (L. Moench)] BAJO LABRANZA DE
CONSERVACIÓN, EN EL VALLE DE MEXICALI, B.C.**

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO ESPECIALISTA EN FITOTÉCNIA

**PRESENTA
ARTURO NÚÑEZ LÓPEZ**

**DIRECTOR
DR. FIDEL NÚÑEZ RAMÍREZ**

MEXICALI BAJA CALIFORNIA

JUNIO DEL 2014

Fertilización nitrogenada en el cultivo de sorgo [*Sorghum bicolor* (L. Moench)] bajo
labranza de conservación en el valle de Mexicali, B.C.

TESIS

Sometida a la consideración del programa de Ingeniero Agrónomo

del

Instituto de Ciencias Agrícolas

por

Arturo Núñez López

Mexicali Baja California

Junio del 2014

ESTA TESIS FUE REALIZADA BAJO LA DIRECCIÓN DEL COMITÉ TUTORIAL,
APROBADA Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO ESPECIALISTA EN FITOTÉCNIA

COMITÉ TUTORIAL:

DIRECTOR _____

DR. FIDEL NÚÑEZ RAMÍREZ

ASESOR _____

DR. LUIS FERNANDO ESCOBOZA GARCÍA

ASESOR _____

M.C. CARLOS CECEÑA DURAN

AGRADECIMIENTOS:

DEDICATORIA:

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo particular	3
2.1.1 Objetivos específicos	3
III. PLANTEAMIENTO DE HIPOTESIS	4
3.1 Hipótesis nula	4
3.2 Hipótesis alterna	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1 Producción de sorgo en México	5
4.2 Factores que limitan la producción de sorgo	6
4.3 Manejo de la fertilización nitrogenada en sorgo	6
4.3.1 Época y cantidad de aplicación	7
4.3.2 Fuente de nitrógeno	9
4.3.3 Pérdida de nitrógeno en el suelo	10
4.3.4 Técnicas de monitoreo nutrimental en cultivos	13
4.4 Labranza de conservación en sorgo	14
4.4.1 Antecedentes	14
4.4.2 Tipos de labranza	15
4.4.3 Prácticas vegetativas en Agricultura de Conservación	18
4.4.4 Impacto de la Agricultura de Conservación en el medio ambiente	19
V. MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1 Ubicación del estudio	24

5.2 Siembra y topología del cultivo	24
5.3 Logística del experimento	25
5.4 Manejo agronómico del cultivo	25
5.4.1 Fertilización	25
5.4.2 Riegos	25
5.4.3 Malezas y plagas	25
5.5 Muestreo de SPAD y extracto celular de tallo	26
5.6 Identificación del crecimiento y desarrollo del cultivo	27
5.7 Determinación del rendimiento	27
5.8 Análisis estadístico	28
VI. RESULTADOS Y DISCUSION	29
6.1 Condiciones climatológicas durante el experimento	29
6.2 Crecimiento y desarrollo del cultivo	32
6.2.1 Etapa de crecimiento reproductivo	35
6.2.2 Etapa de llenado de grano	36
6.3 Rendimiento de grano en sorgo	37
6.4 Índice SPAD	41
6.5 Nitratos en extracto celular de tallo	44
VII. CONCLUSIONES	46
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Calendario, fecha de aplicación e intervalo en días entre cada riego.....	26
Cuadro 2. Fenología del cultivo basado en días después de la siembra y unidades calor acumuladas en el cultivo de sorgo bajo dos sistemas de labranza y seis dosis de fertilización nitrogenada.	36
Cuadro 3. Fenología del cultivo basado en días después de la siembra y unidades calor acumuladas en el cultivo de sorgo bajo dos sistemas de labranza y seis dosis de fertilización nitrogenada.	37
Cuadro 4. Materia seca total, del grano y del follaje y rendimiento de grano en el cultivo de sorgo bajo labranza de conservación y seis dosis de fertilización nitrogenada.	38
Cuadro 5. Materia seca total, de grano y de follaje, y rendimiento de grano en el cultivo de sorgo bajo dos sistemas de labranza.	40

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las temperaturas máximas y mínimas durante el desarrollo y crecimiento del cultivo de sorgo.....	29
Figura 2. Número de horas con temperaturas mayores a los 33°C ocurridas durante el mes de mayo.....	30
Figura 3. Número de horas con temperaturas mayores a los 33°C ocurridas durante el mes de junio.....	30
Figura 4. Número de horas con temperaturas mayores a los 33°C ocurridas durante el mes de julio.....	31
Figura 5. Número de horas con temperaturas mayores a los 33°C ocurridas durante el mes de agosto.....	31
Figura 6. Evolución del crecimiento del cultivo de sorgo expresado en altura bajo dos sistemas de labranza y tres dosis de fertilización nitrogenada.....	33
Figura 7. Evolución del crecimiento del cultivo de sorgo expresado en número de hojas bajo dos sistemas de labranza y tres dosis de fertilización nitrogenada.....	34
Figura 8. Evolución del desarrollo del cultivo de sorgo expresado en diámetro del tallo bajo dos sistemas de labranza y tres dosis de fertilización nitrogenada.....	34
Figura 9. Efecto de la fertilización con nitrógeno en sorgo manejado bajo labranza de conservación (LC) y labranza mínima (LM).....	40

Figura 10. Efecto de la labranza de conservación (LC) y labranza mínima (LM) sobre el rendimiento del cultivo de sorgo.....	41
Figura 11. Relación entre el índice SPAD (80 dds) en sorgo bajo labranza de conservación y el rendimiento del cultivo de sorgo.	43
Figura 12. Relación entre el índice SPAD (127 DDS) y el rendimiento del cultivo de sorgo bajo labranza de conservación (LC:○) y labranza mínima (LM: □).....	44
Figura 13. Relación entre la concentración de NO ₃ (80 DDS) en el extracto celular de tallo y el rendimiento de sorgo labranza de conservación (LC:●) y labranza mínima (LM: □).	45

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue identificar la dosis óptima de fertilización nitrogenada en cultivo de sorgo bajo dos tipos de labranza de conservación, en el ciclo agrícola primavera-verano 2013, en el Campo Agrícola Experimental ICA-UABC del Valle de Mexicali. Se estudió la variedad Pioneer[®] 82G63, se sembró a doble hilera sobre surcos a 0.80 m de distancia, se usó el diseño de bloques al azar con 4 repeticiones y 6 dosis de fertilización nitrogenada (0, 64, 128, 192, 256 y 320 Kg N ha⁻¹) bajo labranza cero (LC) más un tratamiento adicional de 128 Kg N ha⁻¹ bajo labranza mínima (LM). Durante el experimento se midieron en forma semanal las variables: altura, número de hojas y diámetro del tallo. Se determinó el contenido de clorofila en forma de unidades SPAD a los 80 y 127 dds. Adicionalmente se cuantificó la concentración de nitratos en el extracto celular de tallos (ECT) a los 80 dds; al final del estudio, se tomaron parámetros de biomasa seca total, follaje y grano además se determinó el rendimiento de grano (Ton ha⁻¹). Se utilizaron técnicas de regresión y análisis de varianza a los valores medios de los resultados obtenidos con el paquete MINITAB. Ningún tratamiento influyó sobre diámetro del tallo y número de hojas, significando con esto una variable independiente del nitrógeno aplicado, en cambio los tratamientos 128 Kg N ha⁻¹ LC, 320 Kg N ha⁻¹ LC y 128 Kg N ha⁻¹ LM sobresalieron en altura con respecto al tratamiento 0 Kg N ha⁻¹ (104, 109, 102 versus 84 cm, respectivamente). El índice SPAD obtenido a los 80 dds se asoció en forma lineal a los rendimientos obtenidos ($R^2=0.56$; $P<0.05$) mientras que a los 127 dds la asociación fue en forma cuadrática ($R^2=0.85$; $P<0.05$). Por otro lado, la concentración de NO₃ en

ECT, se relacionó con los rendimientos en forma cuadrática ($R^2=0.73$; $P<0.05$) e indicó que los máximos rendimientos son obtenidos cuando las concentraciones de NO_3 en el ECT llegan a 440 mg L^{-1} , de ahí en adelante no hay aumento en los mismos. La presencia temprana de las etapas fenológicas de crecimiento reproductivo y llenado de grano, así como el índice de cosecha estuvieron significativamente relacionadas con los niveles de fertilización nitrogenada ($P<0.05$). Según el cultivo recibió las máximas dosis de nitrógeno, más pronto se presentaron las etapas fenológicas. El tratamiento que obtuvo mayor rendimiento fue el de $320 \text{ Kg N ha}^{-1} \text{ LC}$ con 1.69 ton ha^{-1} . No hubo diferencia estadística de rendimiento de grano entre los sistemas de labranza cero y labranza mínima.

I. INTRODUCCIÓN

La superficie de siembra de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en México es de alrededor de 1.93 millones de hectáreas con rendimientos promedios de 3.86 ton ha⁻¹ (SIAP 2013). En Baja California la superficie se encuentra alrededor de las 1600 hectáreas con rendimientos promedio de 4.5 ton ha⁻¹ (SIAP 2013). Los altos rendimientos de este cultivo dependen principalmente del nivel de tecnología empleado, desarrollo de variedades, aplicación de fertilizantes, manejo de plagas y enfermedades y control y manejo del agua de riego (Malhi *et al.*, 2001). Sin embargo, uno de los principales problemas de la producción agrícola es la erosión de los suelos provocado por la intensa labranza que se realiza antes del establecimiento de cada cultivo (Potter *et al.*, 1996). En este sentido, la labranza de conservación representa una alternativa para la reducción de erosión de suelo al mismo tiempo que se reducen los costos de producción por la utilización de combustibles fósiles (Pimentel *et al.*, 1995). Por otro lado, aplicación de altas dosis de fertilizantes a los cultivos a fin de evitar reducción en los rendimientos (Zhaoa *et al.*, 2005) repercute en la contaminación de mantos freáticos y al ambiente (Malhi *et al.*, 2001). Referente a lo anterior, actualmente existen tecnologías que permiten monitorear la nutrición de cultivo principalmente la fertilización nitrogenada utilizando el medidor de clorofila SPAD (Huang *et al.*, 2008) y midiendo la concentración de nitratos en el extracto celular de tallo relacionada a los rendimientos (Heckman *et al.*, 2002). De tal forma, es posible generar recomendaciones de fertilización al instante, mejorando su momento y dosis de

aplicación haciendo un uso eficiente del recurso a la vez que se evita contaminación al ambiente.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo particular

Identificar la dosis óptima de fertilización nitrogenada en el crecimiento, rendimiento y nutrición del cultivo de sorgo para grano bajo labranza de conservación, producido bajo las condiciones del Valle de Mexicali, B. Cfa.

2.1.1 *Objetivos específicos*

a). Identificar el crecimiento y desarrollo del cultivo de sorgo bajo diferentes dosis de fertilización nitrogenada y sistemas de labranza.

b). Identificar dosis óptima de fertilización nitrogenada para el rendimiento del cultivo de sorgo bajo labranza de conservación.

c). Identificar la relación entre componentes de rendimiento en sorgo producido bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización nitrogenada y la concentración de nitratos en extracto celular de tallo e índices SPAD en hoja.

III. PLANTEAMIENTO DE HIPOTESIS

3.1 Hipótesis nula

La fertilización con nitrógeno no afecta los rendimientos, el crecimiento y la nutrición del cultivo de sorgo bajo labranzas mínima y de conservación

3.2 Hipótesis alterna

La fertilización con nitrógeno afecta los rendimientos, el crecimiento y la nutrición del cultivo de sorgo bajo labranzas mínima y de conservación

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Producción de sorgo en México

El sorgo es una planta originaria de la India y uno de los principales cultivos de México. La mayor parte del sorgo en grano se utiliza en la preparación de alimentos balanceados para animales. El sorgo es el principal ingrediente en la formulación de alimentos balanceados, con el 50% de la composición total, por lo que la producción pecuaria intensiva se encuentra altamente correlacionada con la producción de sorgo. En México los datos de superficie sembrada asciende a las 1.93 millones de hectáreas, mientras que la cosechada es aproximadamente de 1.81 millones de hectáreas, con rendimientos promedio de producción 3.86 toneladas por hectárea. Las principales zonas productoras de sorgo son Tamaulipas y el Bajío (Financiera Rural, 2013).

Para el caso de Baja California, la superficie de siembra es aproximadamente de 1600 hectáreas mientras que la superficie de cosecha representa las 1571 hectáreas con rendimientos promedios de 4.50 toneladas por hectárea (SIAP 2013). Por otro lado los precios actuales del sorgo para grano son los \$3,412.00 en promedio nacional mientras que en el estado de Baja California se encuentran por encima del promedio nacional con \$4,102.00, lo que significa un aumento de alrededor de \$700.00 repercutiendo en mejores beneficios para los productores comparado con cultivos tradicionales como el trigo, el cual siempre anda alrededor de los \$3,500.00 por tonelada (SIAP 2013).

4.2 Factores que limitan la producción de sorgo

De acuerdo con Matlon (1990), entre los principales factores que afectan los rendimientos del cultivo de sorgo son: la variedad, método de siembra, densidad de población, fertilización, riego, control de plagas y enfermedades. La parte ambiental constituida por el clima y el suelo representa una gran importancia en la productividad del cultivo. Dentro de este último factor ambiental (suelo), el manejo de la fertilización nitrogenada es de primordial importancia.

4.3 Manejo de la fertilización nitrogenada en sorgo

El nitrógeno es esencial para el crecimiento de la planta (Mozier *et al.*, 2004) y es uno de los factores principales que limitan el rendimiento del cultivo (Zhao *et al.*, 2005). El nitrógeno es el nutriente más limitante para la producción de cultivos en muchas de las áreas agrícolas del mundo y su uso efectivo es importante para la sustentabilidad económica del sistema de los cultivos. Fageria and Baligar (2005), informaron que la baja recuperación del nitrógeno por los cultivos no es el único factor responsable de los altos costos de producción, sino también de la contaminación ambiental. El manejo adecuado del nitrógeno es necesario para optimizar su utilización mientras se disminuye el riesgo de contaminación y los costos operativos. Para lograr resultados económicamente viables, la fertilización nitrogenada es necesaria para maximizar el rendimiento en los cultivos. Hay una necesidad para usar la mínima cantidad requerida de nitrógeno en cualquier etapa del ciclo de crecimiento (Sheehy *et al.*, 1998). El mal manejo del nitrógeno, tal como su excesiva aplicación, puede resultar en contaminación de las aguas subterráneas (Jaynes *et al.*, 2001). La respuesta de

los cultivos y la eficiencia de utilización del nitrógeno (EUN, definida como la capacidad del cultivo para convertir los nutrientes absorbidos en rendimiento de grano) son importantes para evaluar requerimiento de nitrógeno de sorgo y lograr máximo rendimiento económico.

4.3.1 *Época y cantidad de aplicación*

El tiempo y la colocación del fertilizante nitrógeno tienen una influencia mayor en la eficiencia del sistema de manejo del nitrógeno. Debe ser aplicado al cultivo a tiempo para evitar el estrés en períodos de uso sensible, en etapas críticas y proveer nitrógeno adecuadamente cuando el cultivo lo necesite. La colocación del fertilizante nitrógenado debe aspirar a maximizar su disponibilidad y reducir al mínimo las pérdidas potenciales. Es importante encontrar el nivel óptimo para reducir el costo de producción de los agricultores. Hay necesidad de usar la mínima cantidad de N requerida para la máxima proporción de crecimiento en cualquier etapa durante el ciclo de crecimiento (Sheehy *et al.*, 1998). El requerimiento del elemento para la producción de cultivos, ha sido tradicionalmente determinado en experimentación de campo, involucrando diferentes dosis de aplicación de fertilizante (Muchow *et al.*, 1988). Se han observado respuestas variables a la aplicación del fertilizante nitrogenado en cultivos de maíz (*Zea mays*) y en sorgo (Muchow *et al.*, 1998). Estudios en sorgo de grano han demostrado que la fertilización incorporada al suelo al momento de la siembra, ha aumentado el rendimiento comparado con la aplicación al voleo (Muchow *et al.*, 1998).

De acuerdo a Nimje y Gandhi (1993), la aplicación de fertilizante nitrogenado en dosis de 80 kg ha^{-1} mejora significativamente la germinación, el vigor de la semilla, el rendimiento de grano y la producción de rastrojo así como el contenido de proteína. Tripathi y Bhan (1995), encontraron que 60 kg N ha^{-1} en 2 aplicaciones (una parte en la siembra, en el surco 2-3 cm debajo de la semilla y la porción complementaria restante a los 35 días después de la siembra) aumentaron significativamente el rendimiento de sorgo y sus cualidades. (Rashid *et al.*, 2008), estudiaron el efecto de dosis de N en sorgo para grano. Ellos reportaron una relación positiva entre dosis de nitrógeno y contenido de proteína cruda. Así mismo, encontraron que el contenido de proteína cruda del grano mostró un aumento lineal con aplicaciones de N, alcanzando el máximo a 120 kg N ha^{-1} .

El efecto de diferentes dosis de N en forma de urea y el reemplazo parcial de urea por estiércol y pasta de cacahuete en la producción de grano en sorgo y contenido de proteína, fueron estudiadas por Patel *et al.*, (1994); informaron que el contenido de proteína cruda de los granos aumentó progresiva y significativamente, directamente proporcional a las dosis crecientes de urea, urea + estiércol y urea + pasta de cacahuete. Khosla *et al.*, (2000), indicaron que la siembra de sorgo en un suelo de prueba alto en N mineral (50 kg ha^{-1} en 0.3 m de la superficie) no debería recibir aplicación inicial de N y sí una aplicación complementaria de 130 kg ha^{-1} para volver la fertilización de N económicamente óptima. Para suelos de prueba bajos en N mineral, una aplicación inicial de 40 kg ha^{-1} junto con otra aplicación complementaria de 130 kg ha^{-1} debe optimizar la producción de sorgo. La época de aplicación del N llevará a la conclusión general

de qué tiene que ser aplicado lo más cercano al tiempo que lo necesitan los cultivos.

4.3.2 Fuente de nitrógeno

Nitrato de amonio, amoníaco anhidro, urea y solución urea-nitrato de amonio (UAN), son las cuatro fuentes de fertilizante nitrogenado. Estas formas de N tienen 2 orígenes: El N contenido en los minerales y la enorme cantidad de N en la atmósfera. El N en el suelo es liberado por la descomposición mineral. Éste proceso es por regla general lento y contribuye ligeramente a nutrir de N en la mayoría de los suelos. El N atmosférico es por lo general una fuente mayor de N en los suelos y existe como N_2 la cual es una forma muy inactiva, y para ser utilizada en el suelo debe ser transformada. Plantas, animales y microorganismos pueden morir por deficiencia de nitrógeno, rodeados por N_2 que no pueden utilizar. Ésta transformación es lograda de dos formas: Una porción de N_2 es oxidado a NO_3 . El NO_3 se disuelve en las gotas de lluvia y cae al suelo. La cantidad de nitrógeno agregado al suelo en esta forma es directamente relacionada a la tormenta.

El suministro de N disponible en los suelos es a menudo suplementado por N liberado de la materia orgánica del suelo o materiales orgánicos agregados a los suelos (estiércol, residuos de forrajes, leguminosas, etc.). Algunos microorganismos pueden transformar el N_2 atmosférico para manufacturar compuestos nitrogenados para usarlos en sus células. Éste proceso, llamado fijación biológica del N, requiere energía; por lo tanto, organismos de vida libre que realizan ésta reacción, tal como *Azotobacter*, generalmente fijan poco

nitrógeno, porque su fuente de energía suele ser escasa. La mayor parte de éste N fijado es aprovechado a la muerte del microorganismo para uso de otros organismos. Algunas plantas (leguminosas) como chícharos, soya y cacahuates efectúan una relación simbiótica con bacterias tal como *Rhizobium* que inoculan (nodulan) las raíces. Éstas leguminosas pueden fijar encima de 280 kg N ha^{-1} y por lo general no son fertilizadas. Cuando la cantidad de nitrógeno fijado por *Rhizobium* excede sus necesidades, éste es liberado y usado por la planta leguminosa huésped. Éste es el por qué las leguminosas muy noduladas a menudo no responden a aplicaciones de fertilizante nitrogenado. Ellas están ya recibiendo suficiente de la bacteria.

4.3.3 Pérdida de nitrógeno en el suelo

El nitrógeno en el suelo puede pasar por muchas transformaciones, agrupadas éstas en un sistema llamado “ciclo del Nitrógeno”. El ciclo del nitrógeno tiene varias rutas por las que el nitrógeno disponible para las plantas se puede perder. El fertilizante nitrógeno puede perderse del suelo y los cultivos en varias formas: Emisión gaseosa de plantas, desnitrificación del suelo, corriente superficial de agua, volatilización y lixiviación (Raun y Johnson, 1999). El nitrógeno del NO_3 es en general más sujeto de pérdida que el del NH_4 . El nitrógeno en forma de NO_3 es tan soluble que se lixivia cuándo el exceso de agua se infiltra a través del suelo. Éste puede ser el mayor mecanismo de pérdida en suelos con textura gruesa dónde el agua se infiltra con libertad pero es menos en texturas finas, dónde el suelo es más impermeable y la infiltración es muy lenta. En el proceso de desnitrificación el nitrato (NO_3), es convertido a óxidos gaseosos de nitrógeno y/o

gas N_2 , ambos no aprovechables por las plantas. La desnitrificación puede causar mayores pérdidas cuando los suelos están calientes y permanecen saturados por más de unos pocos días. Las pérdidas de nitrógeno del amonio (NH_4^+), son menos comunes y ocurren principalmente por volatilización. Los iones de amonio esencialmente son moléculas de amoníaco anhidro (NH_3) con un hidrógeno extra (H^+) unido. Cuando éste (H^+) extra es removido del ión NH_4^+ por otro ión tal como un hidroxilo (OH^-), la molécula resultante NH_3 puede evaporarse o volatilizarse desde el suelo. Éste mecanismo es muy importante en suelos con alto pH que contienen grandes cantidades de iones OH^- . La remoción de cultivos representa una pérdida porque el nitrógeno de las partes cosechadas de las plantas es removido completamente del suelo. Debido a que varios sistemas agrícolas favorecen la acumulación de residuos de las plantas en la superficie del suelo, el nitrógeno de los residuos vegetales es vuelto a reciclar dentro del sistema y es mejor inmovilizarlo en lugar de removerlo. Una cantidad de nitrógeno es eventualmente mineralizada y puede ser reutilizada por un cultivo. Muchos estudios han demostrado que incluso bajo el mejor manejo, 30-50% del nitrógeno aplicado se pierde a través de diferentes rutas (Stevenson, 1985), y por lo tanto más fertilizante de lo que realmente necesita el cultivo tiene que ser aplicado para compensar la pérdida.

La pérdida de nitrógeno causa un impacto negativo en el ambiente (Kessel *et al.*, 1993; Gosh y Bath, (1998). La alta cantidad de fertilizante químico causa degradación del suelo y contaminación ambiental (William, 1992). En sistemas de siembra directa, la pérdida de nitrógeno es mucho más alta que en sistemas con

labranza. El sistema de siembra directa a menudo se caracteriza por una acumulación de residuos de cultivo en la superficie del suelo, resultando una cantidad importante de carbono, nitrógeno y contenido de agua en la capa superior (5-10 cm) del suelo comparada con la labranza convencional (Blewings *et al.*, 1997; Doran, 1980), consecuentemente, las bacterias facultativas, anaeróbicas y desnitrificantes son más numerosas en suelos sin labranza (Doran, 1980) y por lo tanto, pérdidas más altas por desnitrificación han sido reportadas en suelos sin labranza que en suelos arados (Doran, 1980).

El manejo del fertilizante N es un problema extremo de alta residualidad debido a la menor disponibilidad de N. Esto se produce debido a la muy lenta mineralización del N (Phillips *et al.*, 1980), la muy alta inmovilización del N, desnitrificación y volatilización de amoníaco NH_3 . Gordon y Whitney (1995), informaron que estando bajo temperaturas de suelo óptimas en ambientes sin labranza, esto fue causa de muy baja disponibilidad de nutrientes en la parte temprana del ciclo de crecimiento. En general, el método de aplicación usado en sistemas sin labranza es al voleo ya sea nitrato de amonio sólido o urea, o rociando solución urea-nitrato de amonio (UAN) en la superficie del suelo inmediatamente antes o después de sembrar (Mengel *et al.*, 1982). Sin embargo, en la aplicación superficial de fertilizante N pueden resultar pérdidas significativas a través de la volatilización del amonio. Eckert, (1987); Fox y Piekielek, (1987); Mengel *et al.*, (1982), han demostrado que dosis similares de N, aplicadas al voleo han producido rendimientos más bajos que en cualquiera de las dos formas: inyectado o aplicado en banda sobre la superficie.

4.3.4 Técnicas de monitoreo nutrimental en cultivos

El conocimiento detallado de la nutrición de cultivos implica saber identificar si los nutrientes aplicados al cultivo están siendo aprovechados por la planta o están siendo aplicados en exceso y en consecuencia se generan pérdidas al ambiente. La determinación de clorofila en los tejidos de las plantas está íntimamente ligada al estado nutrimental del cultivo principalmente nitrógeno, magnesio y hierro (Shaahan, 1999). El medidor de clorofila rápido es llamado SPAD y mide la relación entre la clorofila presente en el tejido de la planta y estimación indirecta de la concentración de nitrógeno en tejido.

Los medidores de clorofila se utilizan ampliamente en la agricultura para la estimación de la clorofila en numerosas especies vegetales (Hawkins, 2009). Algunos investigadores han presentado pruebas de las limitaciones de la utilización de medidores de clorofila, encontrando relaciones matemáticas entre las lecturas SPAD y la clorofila foliar, las condiciones de crecimiento y la etapa fenológica de cada cultivo en particular (Hawkins, 2009).

Recientemente se han desarrollado técnicas de monitoreo nutrimental asociadas al rendimiento potencial en varios cultivos entre los que destacan el índice de clorofila denominado índice SPAD y la cuantificación de nitratos en el extracto celular de tallo, pecíolo o raíz a través de ionímetros portátiles denominados Cardy (Núñez-Ramírez, 2012).

El Cardimetro tiene la ventaja de analizar las concentraciones de NO_3 en extracto celular al instante y sin necesidad de enviar las muestras al laboratorio. (Hochmuth *et al.*, 1998) utilizaron las mediciones del cardimetro en el extracto

celular de peciolo de muchas hortalizas, mostrando su credibilidad para predecir el estado nutrimental de dichos cultivos.

4.4 Labranza de conservación en sorgo

El modelo de producción agrícola actual, basado en el éxito de la revolución verde, alcanzó su clímax en la década de los sesentas del siglo pasado; sin embargo, este sistema intensivo de producción no consideró los efectos negativos en el ambiente, causados por el uso de tecnologías inicialmente impactantes, tales como la mecanización, altas dosis de fertilizantes químicos y el empleo de plaguicidas. En forma paralela a ese modelo de producción, en diferentes partes del mundo, se inició un movimiento con un enfoque de protección ecológica, denominado Agricultura de Conservación, que combina la labranza de conservación con la rotación de cultivos (Abelson, 1995; Hamblin, 1995; Jiménez y Lamo, 1998).

En la Agricultura de Conservación, se promueve evitar el barbecho durante la preparación del terreno para la siembra, debido a que esta práctica disemina la materia orgánica que se acumula en la superficie del suelo, afecta desfavorablemente su estructura, reduce la capacidad de infiltración del agua y aumenta el riesgo de erosión (Faulkner, 1974).

4.4.1 Antecedentes

Uno de los aspectos críticos en la mecanización de la agricultura es la preparación del suelo con métodos que invierten el perfil entre cero y 30 cm de profundidad y cambian desfavorablemente sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Durante más de 100 años se ha aceptado que el barbecho y el rastreo

son la única alternativa previa a la siembra, sin tomar en cuenta el tipo de suelo, clima, cultivo, así como las experiencias científicas locales (Figuroa y Morales, 1992).

Sin duda, el cambio de tracción animal por tracción mecánica fue un gran logro tecnológico que ayudó a optimizar tiempo y esfuerzo en las labores agrícolas; sin embargo, el cambio constante en la estructura del suelo, ha ocasionado deterioros como erosión, encostramiento y compactación superficial, reducción en la velocidad de infiltración de agua, pérdida de nutrimentos, disminución de la materia orgánica, alteración de la fauna edáfica y disminución en el rendimiento de cosechas (Black, 1973; Wilson, 1978; Post *et al.*, 1990; FAO, 1992; Reicosky y Lindstrom, 1993; Ismail *et al.*, 1994; y Navarro *et al.*, 2000).

En la agricultura de conservación, las partículas de suelo no están desmenuzadas y la superficie del suelo está protegida total o parcialmente con rastrojo o paja de cultivos anteriores. Esto reduce en 80% las pérdidas de suelo, en comparación con la labranza tradicional (Tiscareño y Báez, 2000). La superficie del suelo debe estar cubierta al menos en 30% para reducir la erosión a niveles aceptables (FAO, 1992).

4.4.2 Tipos de labranza

La labranza es toda acción mecánica que altere la estructura del suelo a fin de proporcionar las condiciones adecuadas para la siembra y germinación de semillas, así como el desarrollo de raíces y planta (Velásquez *et al.*, 1997). La labranza primaria se realiza para preparar la cama de siembra; su objetivo es remover la vegetación presente, reducir la compactación y promover la rugosidad

superficial a través de la formación de terrones en el suelo; se realiza con arado de vertedera, cinceles, arado de discos, subsolador y rastra de discos (Benitez, 1992). La labranza secundaria implica el movimiento del suelo después de la siembra, para romper costras superficiales, arrojar humedad y aflojar el suelo (FAO, 1992).

Labranza convencional. Son las operaciones de labranza primaria y secundaria adoptadas en una región. En las zonas agrícolas de México se refiere generalmente a las acciones de barbechar y rastrear (Angeles y Rendón, 1994).

Labranza mínima o reducida. Consiste en omitir el barbecho en la preparación del suelo. Se puede emplear únicamente la rastra, o cinceles especializados como el “vibrocultor”, o la pata de “ganso”. Los residuos vegetales son incorporados en la capa superficial del suelo con la rastra; mientras que, con los implementos que no invierten el perfil, éstos permanecen en la superficie. El control de la maleza puede ser mecánico, mediante escardas o combinado con herbicidas (Jiménez y Lamo, 1998).

Labranza cero. En este tipo de labranza, no se realiza movimiento del suelo. La siembra se efectúa en forma directa y solo se abre una pequeña franja de suelo en donde se deposita el fertilizante y la semilla. Se reduce la cantidad de energéticos empleados. El control de la maleza antes de la siembra y durante el desarrollo del cultivo se realiza con herbicidas (Unger, 1988).

Labranza en surcos. La siembra se realiza en los surcos formados durante las escardas del cultivo anterior. La erosión del suelo se controla al dejar del 30 al 50% de residuos de la cosecha anterior, hasta el momento de sembrar. Sin

embargo, durante la siembra se emplea maquinaria con limpiadores para despejar el lomo del surco. Con este método se puede evitar el uso de herbicidas y controlar la maleza con una o dos escardas. La labranza en surcos es adecuada para suelos con problemas de drenaje.

Labranza en franjas. Únicamente se remueven franjas aisladas del suelo para realizar la siembra, el resto del terreno queda intacto. Generalmente se quita la cubierta de residuos de cosecha en la franja que se prepara por lo cual se reduce su efectividad para controlar la erosión del suelo. Se puede combinar con la labranza en surcos para realizar escardas y reducir la cantidad de herbicida en el control de la maleza (Pérez y Velásquez, 1997).

Labranza de conservación. Es la combinación de la labranza cero y el manejo de coberturas. Implica cubrir por lo menos el 30% de la superficie del suelo con rastrojo o paja. Se refiere también a métodos que permitan romper el endurecimiento del suelo sin invertir su perfil, tales como el cincel, vibrocultor, multiarado y subsuelo. En este sistema, la cama de siembra solamente es alterada durante la siembra directa, los residuos de cosecha no se incorporan al perfil del suelo y se dejan sobre la superficie generando un mantillo (Erenstein, 1999).

Labranza de conservación con el multiarado. El “multiarado” está conformado por un cincel modificado con una punta de arado y aletas cortadoras. Este implemento rotura el suelo dejando los residuos de cosecha en la superficie. Las aletas cortadoras trozan las raíces de las plantas presentes, lo cual favorece el control de malezas; facilita también el control de los rebrotes de cultivos como el sorgo y la avena. El método de labranza de conservación con el “multiarado” consiste en la

roturación del suelo después de la cosecha del cultivo anterior. Se debe realizar cuando el suelo tenga una humedad intermedia, es decir, ni muy húmedo, ni muy seco. Con el “multiarado” el suelo se rotura en forma vertical y horizontal, a diferencia de los cinceles tradicionales, los cuales aran el suelo solamente en forma vertical. La principal ventaja de esta roturación horizontal es el incremento en la infiltración del agua.

4.4.3 Prácticas vegetativas en Agricultura de Conservación

Las prácticas vegetativas consideran el desarrollo de plantas o cultivos, o el manejo de la vegetación natural, con la finalidad de mejorar la capacidad productiva de los terrenos y ayudar a disminuir la erosión del suelo. Las más conocidas son las siguientes:

Rotación de cultivos. Se refiere al crecimiento de dos o más cultivos en el mismo terreno, estableciendo uno después de cosechar el otro. Generalmente se recomienda sembrar una leguminosa después de una gramínea o bien un cultivo tupido (avena, cebada o trigo) después de uno de surco.

Cultivo en fajas. Implica el establecimiento de dos o más cultivos en el mismo período o ciclo de cultivo. Un ejemplo sería 10 surcos de maíz, 10 de frijol y 10 de avena.

Cultivos asociados o policultivos. Implican el crecimiento de dos o más cultivos en el mismo terreno y al mismo tiempo. En México la asociación maíz-frijol ha sido utilizada desde épocas prehispánicas.

Cultivos de cobertera. Es el establecimiento de cultivos después de la cosecha del cultivo de interés económico, con el fin único de mantener cubierto el suelo y

reducir las pérdidas por erosión. Generalmente se trata de un cultivo tupido en el cual es recomendable la presencia de una leguminosa de ciclo corto.

Abonos verdes. Implica que el cultivo de cobertera se incorpore al suelo para incrementar su fertilidad. La incorporación se debe realizar con suficiente tiempo antes de la siguiente siembra, para promover la descomposición de las plantas

4.4.4 Impacto de la Agricultura de Conservación en el medio ambiente

Impacto de las prácticas de manejo sobre la fauna y la fertilidad del suelo. En un sistema con cultivos de cobertura y labranza reducida o cero la materia orgánica puede aumentar en el suelo, lo cual tiene gran influencia sobre la actividad y la población de los microorganismos. Esto lleva a una mayor actividad biológica, más formación de humus y, por ello, un color más oscuro de la capa superficial de suelo. Con el correr del tiempo, en los sistemas de labranza reducida o de labranza cero la fauna del suelo toma a su cargo las funciones de la labranza tradicional, o sea aflojar el suelo y mezclar sus componentes. Además, la mayor actividad biológica crea una estructura estable del suelo por medio de la acumulación de materia orgánica (FAO, 2000). Una consecuencia del mantenimiento de la calidad del suelo es favorecer la actividad benéfica de los organismos del suelo. Varios estudios han indicado que los sistemas de labranza cero incrementan la biomasa microbiana y el tamaño de la población (Ferreira *et al.*, 2000). En los sistemas de labranza cero en el sur de Brasil se encuentran diferencias de hasta 50% en la biomasa del suelo y en las poblaciones rizobianas comparadas con la labranza convencional (Hungría *et al.*, 1997). Las evaluaciones han demostrado que algunas rotaciones de cultivos y la labranza cero favorecen

las poblaciones de *Bradyrhizobium* sp., la nodulación y, por lo tanto, la fijación de nitrógeno y los rendimientos (Voss y Sidirias, 1985; Hungría *et al.*, 1997; Ferreira *et al.*, 2000). La cobertura vegetal sobre la superficie del suelo crea un ambiente más húmedo que favorece la actividad de los organismos del suelo. El mayor número de lombrices, termitas, hormigas y ciempiés combinado con una mayor densidad de las raíces de las plantas da lugar a poros más grandes que a su vez favorecen la infiltración del agua (Roth, 1985). En un experimento en el sur de Brasil la infiltración del agua de lluvia aumentó de 20mm/h bajo labranza convencional a 45 mm/h bajo labranza cero (Calegari *et al.*, 1998). Como resultado, se puede reducir la erosión a un nivel por debajo de la tasa de regeneración del suelo y los recursos de suelos y aguas subterráneas pueden ser mantenidos o aun fortalecidos (Derpsh, 1997). La lixiviación de los nutrientes de las plantas u otras sustancias hacia los acuíferos también se reduce (Becker, 1997) cuando se compara la agricultura convencional con la labranza de conservación. La materia orgánica también juega un papel importante en la formación y la estabilización de los agregados del suelo conectando los polímeros orgánicos y la superficie inorgánica con cationes polivalentes. Las hifas de los hongos y el mucílago de las bacterias, si bien se forman y se descomponen rápidamente, tienen una función importante para conectar las partículas de suelo (FAO, 2000). También existe una fuerte relación entre el contenido de carbono del suelo y el aumento del tamaño de los agregados. (Castro Filho *et al.*, 1998) encontraron un incremento del contenido de carbono del suelo bajo labranza cero que dio lugar a un 134% de incremento de los agregados de más de 2 mm y a 38% de disminución en los agregados de menos de 0.25 mm, comparado con la

labranza convencional. (Amado *et al.*, 1998) informan que en una investigación después de 9 años el sistema de labranza de conservación tenía un aumento de 24% de nitrógeno en el suelo comparado con la labranza convencional. Calegari y Alexander (1998) encontraron que después de 9 años el contenido de fósforo inorgánico y total de la capa superficial de 0-5 cm era más alto en las parcelas con cultivos de cobertura y además observaron que las parcelas con labranza convencional tenían un contenido de fósforo 25% menor que las parcelas de labranza cero. Según (Burle *et al.*, 1997), en general, los sistemas basados en leguminosas no incrementaron la acidificación del suelo en la capa superficial donde ocurría la mayor acumulación de materia orgánica pero si indujeron la mayor capacidad de intercambio de cationes.

Mitigación de los cambios climáticos y de los gases de invernadero. La mitad del incremento del calentamiento global desde el inicio de la revolución industrial es considerado consecuencia de un aumento del nivel de bióxido de carbono en la atmósfera (Lal, 1999). Las fuentes de emisión de gases de bióxido de carbono incluyen la quema de combustibles fósiles, la producción industrial, la deforestación y la agricultura (Benítez *et al.*, 1999). La emisión de CO₂ a la atmósfera está relacionada con los procesos de mineralización y descomposición de la materia orgánica por los microorganismos (Lal, 1999). La emisión de bióxido de carbono del suelo aumenta con la labranza, al mezclar los residuos de los cultivos y otra biomasa de la superficie del suelo y por la quema de la biomasa. Del mismo modo, el potencial de la agricultura y de los bosques para secuestrar carbono –o sea, la absorción de carbono por la biomasa- es significativa. Estudios

en el sur de Brasil muestran un incremento del carbono orgánico del suelo bajo los sistemas de agricultura de conservación (FAO, 2000). Por ejemplo, los sistemas basados en la adición de grandes volúmenes de residuos y la no labranza tienden a acumular más carbono en el suelo que el que es liberado hacia la atmósfera (Greenland y Adams, 1992). (Calegari y Alexander, 1998) informan que todos los cultivos invernales de cobertura presentaron mayores valores de carbono orgánico que las parcelas en barbecho, a ambas profundidades. (Castro Filho *et al.*, 1998) encontraron un 29% de incremento del carbono orgánico entre 0-10 cm del suelo sin labranza comparado con el sistema de labranza tradicional.

Comparado con el sistema de cultivo barbecho-maíz, que fue tomado como referencia, el contenido de carbono del suelo aumentó en 47% en el sistema maíz-lablab (*Dolichos lablab*) y en 116% en el sistema maíz-ricino (*Ricinus communis*). En los sistemas en que se aplicó nitrógeno como fertilizante, el contenido de carbono se incrementó aún más (Testa *et al.*, 1992). Bayer,(1996) encontró que los sistemas de rotación de cultivos acumulaban cerca de 11 t/ha de carbono en la parte superior del suelo (0-17.5 cm) después de 9 años.

Reducción de la contaminación y polución de la aguas. El cambio de uso y manejo de la tierra junto con prácticas conservacionistas eficaces lleva a una importante reducción de la erosión y con ello a una disminución de la polución y contaminación de las aguas (FAO, 2000).

Fortalecimiento de la biodiversidad. El resultado del incremento de la cobertura del suelo por medio de los cultivos y de sus residuos es un aumento en la variedad y variabilidad de los animales, plantas y microorganismos, los cuales son

absolutamente necesarios para que se cumplan las funciones básicas del agroecosistema. La agricultura de conservación proporciona más hábitats para las aves, los pequeños mamíferos, reptiles y lombrices de tierra, entre otros, y más alimentos, incluyendo insectos y semillas, lo cual a su vez resulta en un incremento de las especies y de la población. (FAO, 2000).

Menor vulnerabilidad a los desastres naturales. Las mejores condiciones del suelo hacen que la tierra y los sistemas de producción tengan mejor capacidad de recuperación a eventos extremos (FAO, 2000).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Ubicación del estudio

El experimento se estableció en terrenos del Campo Agrícola Experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas ubicado en el Ejido Nuevo León, B. C., coordenadas $32^{\circ} 40'$ latitud norte y $114^{\circ} 45'$ longitud oeste. En ésta región agrícola prevalece un clima desértico cálido, extremoso en demasía y régimen de lluvias en invierno (BW [h'] hs [x'] [e']; INIFAP, 2010), con temperaturas de 50° C durante el verano y en invierno hasta de -7° C, con una temperatura media anual de 22.3° C y una precipitación media anual de 58 mm. La altitud varía de -2 hasta los 43 m.s.n.m. con una topografía por lo general plana (INIFAP, 2010).

5.2 Siembra y topología del cultivo

La siembra se realizó en forma mecánica con sembradora para labranza mínima multipropósito, en seco a doble hilera sobre surcos a 0.80 m de distancia. Se depositaron 14 Kg ha^{-1} de semilla para lograr una densidad de población de 266,000 plantas. La superficie del experimento bajo labranza cero fue de 624 m^2 (65 m de largo x 9.6 m de ancho) la cual se dividió en 24 parcelas con 3 surcos cada una, orientados de norte a sur; con un callejón de 1 m entre parcelas. Adicionalmente se evaluó en un terreno adyacente el efecto de una dosis de nitrógeno (T_3 : 128 kg N ha^{-1}) en sorgo bajo labranza mínima (doble paso con rastra de discos).

5.3 Logística del experimento

Los tratamientos evaluados bajo labranza cero fueron 6 dosis crecientes de nitrógeno: 0, 64, 128, 192, 256 y 320 Kg N ha⁻¹, identificados como T₁, T₂, T₃, T₄, T₅ y T₆ respectivamente; se distribuyeron bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. Como parcela útil se cosecharon dos metros del surco central de cada tratamiento. También se evaluó la dosis T₃ bajo labranza mínima (doble paso con rastra de discos).

5.4 Manejo agronómico del cultivo

5.4.1 Fertilización

La fuente de fertilizante fue urea (46-00-00). Manualmente se aplicaron las dosis a evaluar en tres etapas: un 50% en pre siembra (24 de marzo), 24% en el primer riego de auxilio (3 de mayo) y 26% en el segundo riego de auxilio (3 de junio). No se utilizó ningún otro nutriente.

5.4.2 Riegos

Desde que comenzó el experimento se realizaron un total de nueve riegos, intentando que el cultivo no sufriera estrés hídrico. La fecha y el intervalo de días entre cada evento se presenta en el cuadro 1.

5.4.3 Malezas y plagas

Durante el primer mes de desarrollo del cultivo, se tuvo presencia de pulga negra (*Epitrix spp.*) la cual se controló mediante dos aplicaciones de Metamidofos a dosis de 1 L ha⁻¹. Para el caso de malezas, la única que se presentó fue zacate de agua [*Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv.] y se erradicó con dos limpiezas mediante control manual (con azadón).

Cuadro 1. Calendario, fecha de aplicación e intervalo en días entre cada riego.

Riego	Fecha	Intervalo en días
Germinación	25 marzo	-
Sobre-riego	10 abril	16
1º auxilio	3 mayo	23
2º auxilio	3 junio	31
3º auxilio	17 junio	14
4º auxilio	4 julio	17
5º auxilio	19 julio	15
6º auxilio	1º agosto	13
7º auxilio	21 agosto	20

5.5 Muestreo de SPAD y extracto celular de tallo

La determinación del contenido de clorofila en las hojas se realizó en tres plantas de cada parcela con muestras a los 80 días después de siembra [dds] (etapa de crecimiento vegetativo) y 127 dds (inicio de floración). La lectura se tomó en la parte media, en sentido transversal y longitudinal de la hoja más recientemente madura (HMRM). La cantidad de clorofila se midió con el aparato portátil SPAD 502 (Minolta Camera Co., Ltd., Japan^R). Para el caso de la determinación de NO₃ en el extracto celular, se realizó un muestreo en la etapa de crecimiento vegetativo a los 80 dds. Se cortaron con tijeras, en la parte del tallo más cercana al suelo, tres plantas de cada parcela, a cada planta se le cortó un pedazo de 2 cm de tallo de la parte inferior, en bolsas de plástico etiquetadas se guardaron en un recipiente hermético. El muestreo se hizo en horario de 8:00 a 10:00 a. m. para evitar variaciones de nitratos durante el día. Posteriormente en el

Laboratorio de Agua y Suelo del Instituto de Ciencias Agrícolas de la UABC, el extracto celular se extrajo con una prensa manual para ajos y el análisis se realizó utilizando un medidor portátil de iones (Cardy Nitrate Ion Meter – Horiba, Inc^R).

5.6 Identificación del crecimiento y desarrollo del cultivo

La toma de datos del crecimiento y desarrollo del cultivo, se llevó a cabo cada semana a partir de los 24 DDS en 10 plantas representativas de los tratamientos 0, 128, 320 kg N ha⁻¹ de labranza de conservación y 128 de labranza mínima. Se midieron las siguientes variables: altura, número de hojas y diámetro de tallo. Se hizo un registro fenológico del ciclo vegetativo expresado como DDS y unidades de calor acumuladas {UCAs} ($[(\text{temperatura máxima} + \text{temperatura mínima})/2 - 11]$) de las tres etapas de desarrollo del sorgo: 1^a etapa de crecimiento vegetativo. 2^a etapa de formación de las estructuras reproductivas (Iniciación de la panoja, hoja bandera, panojamiento y floración). 3^a etapa de llenado de grano (Estado lechoso, masa suave, masa dura y madurez fisiológica).

5.7 Determinación del rendimiento

Las panojas se cortaron manualmente el 17 de septiembre y posteriormente se desgranaron con una combinada manual para granos con motor de $\frac{3}{4}$ HP. Se pesó individualmente el rendimiento de grano de cada parcela y se transformó a Ton ha⁻¹. Adicionalmente se cosecharon cinco plantas por parcela y se les determinó el peso seco de la planta completa, del grano y follaje, además se obtuvo el índice de cosecha.

5.8 Análisis estadístico

Cosechadas las parcelas experimentales, a los datos de rendimiento se les realizó análisis de regresión con el paquete estadístico MINITAB. Para el caso de los datos de crecimiento y desarrollo, estos se graficaron versus tiempo y se les determinaron la desviación estándar de la media. Los datos de ECT e índice SPAD, se graficaron versus rendimiento a través de técnicas de regresión. Para el caso de rendimiento se compararon los tratamientos de labranza cero con las dosis de fertilización nitrogenada. Para el caso del tratamiento labranza mínima éste se comparó con el tratamiento de 128 Kg ha^{-1} de labranza cero. La regresión también fue entre dosis en los tratamientos de labranza de cero y solo se agregó el dato de labranza mínima para conocer su ubicación dentro del modelo generado.

VI. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados que se obtuvieron en el presente experimento bajo las condiciones climatológicas del valle de Mexicali, fueron los siguientes:

6.1 Condiciones climatológicas durante el experimento

Las condiciones de temperatura de aire que prevalecieron durante el tiempo que duró el estudio son presentadas en la figura 1. Sobresale el hecho de que durante estos meses, se tuvieron temperaturas extremadamente altas, las cuales fueron perjudiciales para la obtención de un rendimiento sobresaliente. Por ejemplo, se aprecia que durante marzo la temperatura máxima promedio fue de 30.5°C; en abril de 31.3°C; en mayo de 35.3°C; en junio de 39.7°C; destacando en julio de 40.3°C; en agosto fue de 39.4°C; mientras que en septiembre de 38.6°C.

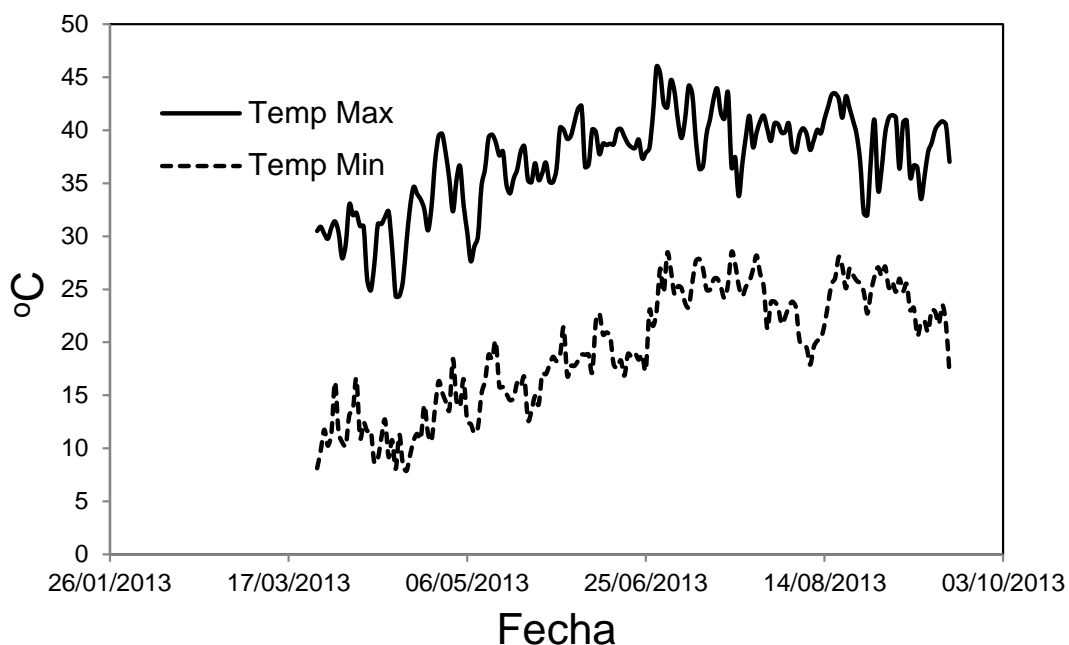


Figura 1. Evolución de las temperaturas máximas y mínimas durante el desarrollo y crecimiento del cultivo de sorgo.

Por otro lado el mes de mayo tuvo 24 días con temperaturas $>33^{\circ}\text{C}$ (Figura 2), junio tuvo 30 días con temperaturas $> 33^{\circ}\text{C}$ (Figura 3), julio tuvo 31 días con temperaturas $>33^{\circ}\text{C}$ (Figura 4) mientras que el mes de agosto tuvo 31 días con temperaturas $>33^{\circ}\text{C}$ (Figura 5).

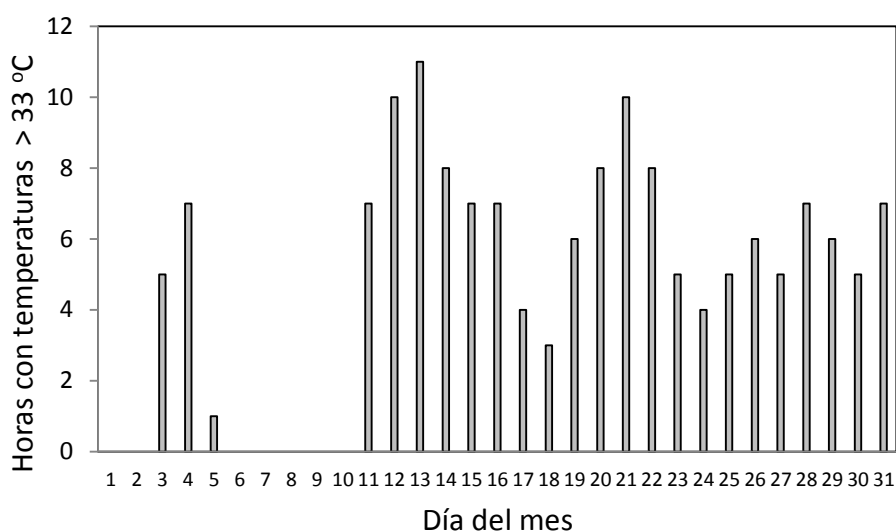


Figura 2. Número de horas con temperaturas mayores a los 33°C ocurridas durante el mes de mayo.

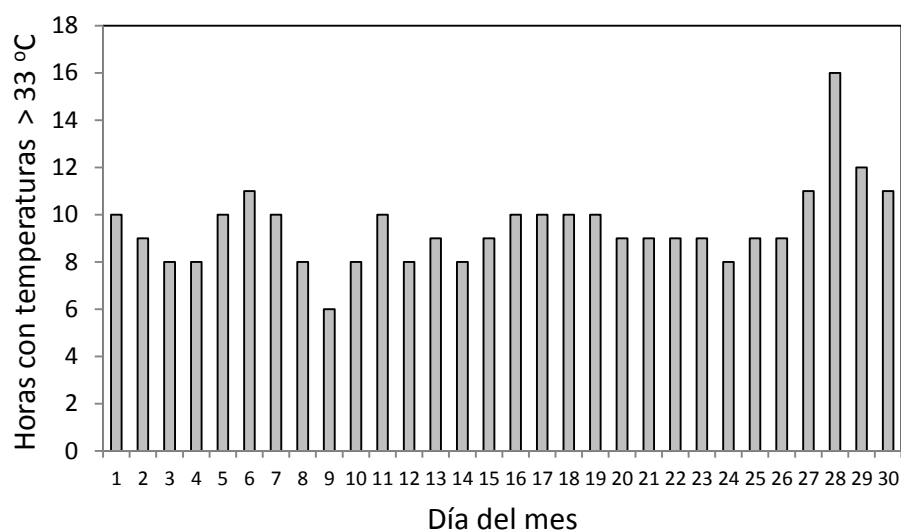


Figura 3. Número de horas con temperaturas mayores a los 33°C ocurridas durante el mes de junio.

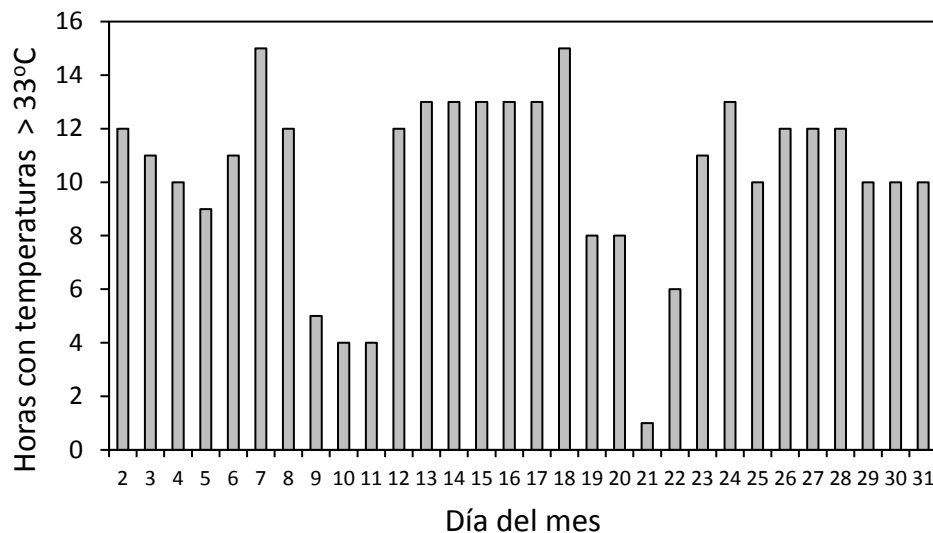


Figura 4. Número de horas con temperaturas mayores a los 33°C ocurridas durante el mes de julio.

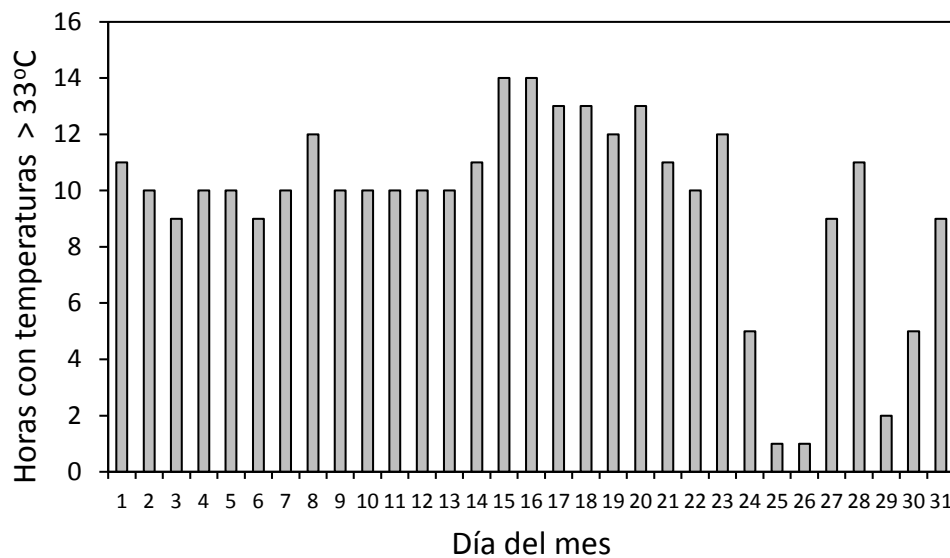


Figura 5. Número de horas con temperaturas mayores a los 33°C ocurridas durante el mes de agosto.

Tomando en consideración lo anterior y aunque el sorgo es un cultivo para grano en regiones semiáridas del mundo, los intervalos de temperatura media óptima para su crecimiento oscilan entre los 21 a 35° C al momento de la

germinación de semilla, mientras que para su crecimiento vegetativo, las temperaturas oscilan entre los 26 a 34°C, las ideales para crecimiento reproductivo fluctúan entre los 25 a 28°C (Maití, 1996).

En este sentido, durante este estudio el cultivo estuvo expuesto a períodos largos de estrés por alta temperatura durante su crecimiento reproductivo (>33°C). Estrés por alta temperatura causa disminución significativa de la producción de grano en sorgo (Prasad *et al.*, 2006). Además, temperaturas arriba de 33/28°C (día/noche) durante etapas tempranas del desarrollo de la panoja provocan aborto del embrión y de la inflorescencia (Downes, 1972). Las altas temperaturas también disminuyen la duración del llenado del grano, resultando un grano de tamaño más pequeño y muy baja producción de semillas (Chowdhury y Wardlaw, 1978; Kiniry y Musser, 1988).

6.2 Crecimiento y desarrollo del cultivo

Las figuras 6, 7 y 8 presentan el crecimiento y desarrollo del cultivo expresado como altura, número de hojas y diámetro del tallo en días después de la siembra. En este experimento, la emergencia se vio afectada por la formación de costra debido a la textura arcillosa del suelo. A consecuencia del tamaño reducido de la semilla de sorgo, la formación de costras obstaculiza su capacidad para emerger (Gerik *et al.*, 1993), por tal motivo, en este estudio se aplicó un sobre riego a los 16 dds, con el fin de reducir el efecto anteriormente mencionado (cuadro 1).

La literatura menciona que el sorgo después de su emergencia, crece a través de tres etapas: desarrollo vegetativo, desarrollo reproductivo y llenado de

grano. El crecimiento de la planta de sorgo va desde la emergencia hasta la madurez fisiológica y el tiempo requerido para cada etapa depende del genotipo y de las condiciones ambientales durante el ciclo vegetativo (Vanderlip, 1993).

En este estudio, la altura resultó afectada por los tratamientos aplicados, (Figura 6). Los tratamientos de 128 kg N ha^{-1} LC, 320 kg N ha^{-1} LC y 128 kg N ha^{-1} LM, resultaron ser superiores al tratamiento 0 kg N ha^{-1} . Dichos tratamientos alcanzaron una altura de 105 cm mientras que el tratamiento 0 kg N ha^{-1} , alcanzó solo los 95 cm de altura. Sin embargo, la aparición de hojas (Figura 7) y el diámetro del tallo (Figura 8) no se asociaron a las dosis de nitrógeno aplicadas, significando que estas variables se comportan independientes de los tratamientos aplicados.

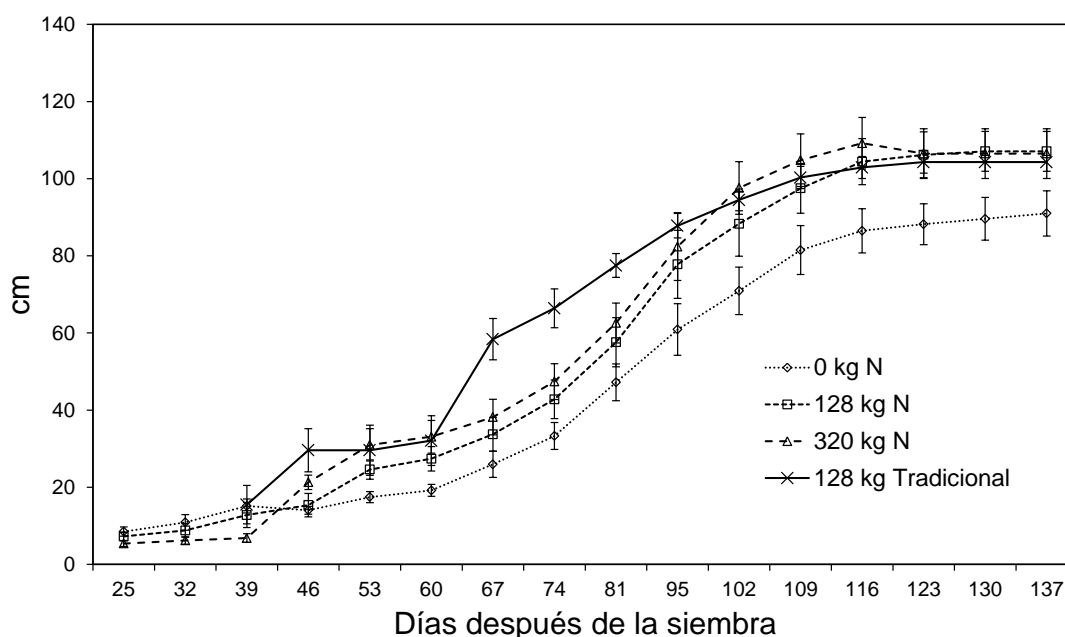


Figura 6. Evolución del crecimiento del cultivo de sorgo expresado en altura bajo dos sistemas de labranza y tres dosis de fertilización nitrogenada.

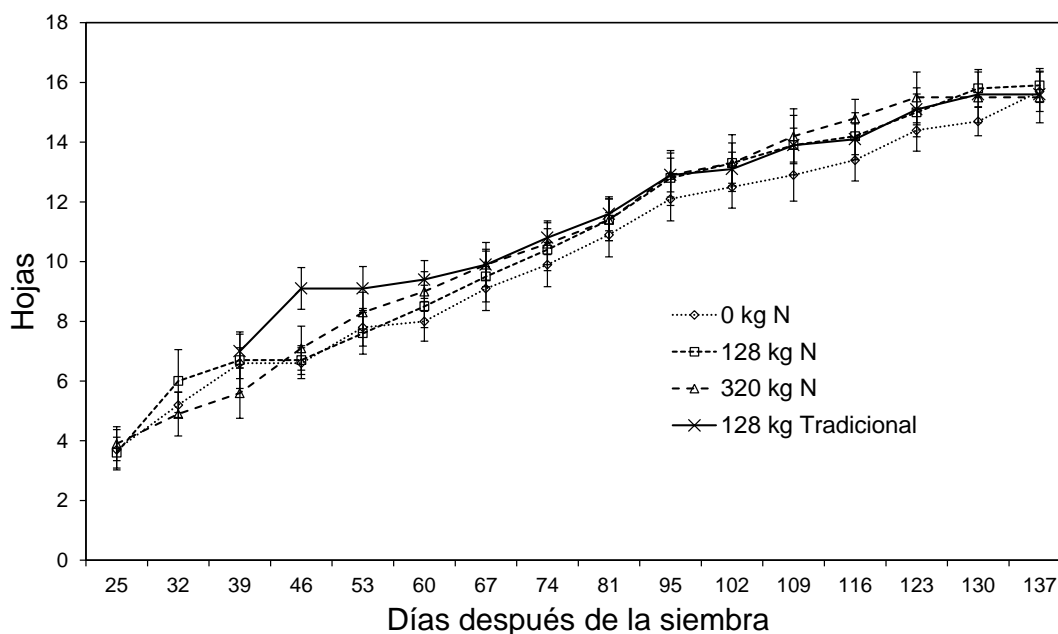


Figura 7. Evolución del crecimiento del cultivo de sorgo expresado en número de hojas bajo dos sistemas de labranza y tres dosis de fertilización nitrogenada.

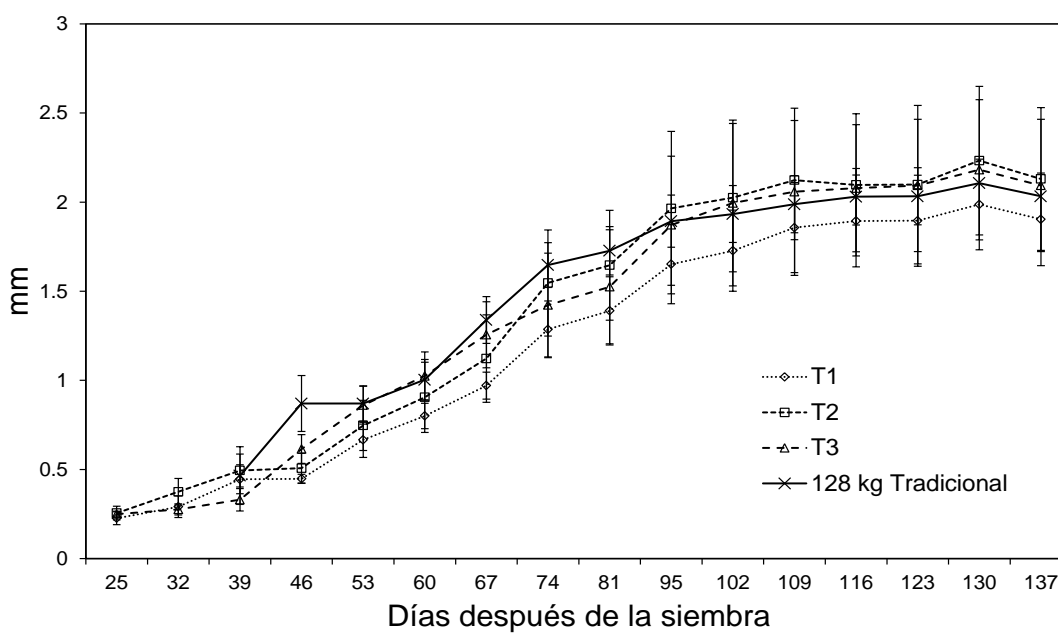


Figura 8. Evolución del desarrollo del cultivo de sorgo expresado en diámetro del tallo bajo dos sistemas de labranza y tres dosis de fertilización nitrogenada.

6.2.1 Etapa de crecimiento reproductivo

Los cuadros 2 y 3, presentan el número de días después de la siembra y las unidades calor acumuladas en que se presentaron los eventos de hoja bandera, floración y llenado de grano (grano lechoso, masa suave, masa dura y madurez fisiológica) en el cultivo de sorgo. La etapa de hoja bandera y floración estuvieron fuertemente asociadas a la aplicación de las dosis de fertilizante. La aparición de la hoja bandera sufrió un retraso de 31 días comparando el tratamiento 0 kg N ha^{-1} y el tratamiento 320 kg N ha^{-1} .

La floración por su parte apareció primero en los tratamientos con mayor cantidad de nitrógeno aplicado (129 dds en el tratamiento con 320 kg N ha^{-1} y 154 dds en el tratamiento con 0 kg N ha^{-1}). Según la literatura revisada, la etapa de crecimiento reproductivo comienza con la iniciación de la panoja y termina con la floración, considerándose como un período crítico ya que cualquier factor biótico o abiótico (altas temperaturas) que impida el desarrollo de la panoja reducirá el número de granos que se formarán, disminuyendo con ello el rendimiento en grano (Gerik *et al.*, 1993).

El cuadro 2 muestra que hubo efectos significativos ($P < 0.05$) de los tratamientos de N en la fenología del cultivo. Un híbrido de ciclo intermedio requiere aproximadamente de 70 a 80 DDS para llegar de etapa de emergencia a etapa de floración (Gerik *et al.*, 1993). En este estudio, el desarrollo fenológico la floración se presentó a los 129 DDS, lo cual es un retraso demasiado prolongado, por lo tanto debido a las condiciones climatológicas prevalentes durante el desarrollo del experimento en la que hubo una gran cantidad de períodos largos

de altas temperaturas, sugiere que el cultivo tuvo estrés por altas temperaturas y en consecuencia, la reducción en los rendimientos (Cuadro 4).

Cuadro 2. Fenología del cultivo basado en días después de la siembra y unidades calor acumuladas en el cultivo de sorgo bajo dos sistemas de labranza y seis dosis de fertilización nitrogenada.

Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	Hoja bandera		Floración		Grano lechoso	
	DDS [£]	UCAs [¥]	DDS	UCAs	DDS	UCAs
0 LC ^α	139	2268	154	2590	163	2778
64 LC	132	2134	150	2508	159	2689
128 LC	122	1922	141	2305	149	2484
192 LC	118	1840	139	2268	148	2461
256 LC	113	1729	138	2251	147	2438
320 LC	108	1618	129	2073	139	2268
128 LM ^β	122	1922	140	2286	148	2461
R ²	0.9665	0.9707	0.9065	0.8922	0.8697	0.8749
Significancia	*	*	*	*	*	*

LC^α: Labranza de conservación; LM^β: Labranza mínima; DDS[£]: Días después de la siembra; UCAs[¥]: Unidades calor acumuladas; Significancia a P<0.05.

6.2.2 Etapa de llenado de grano

Según se aprecia tanto en el cuadro 2 como en el 3, el llenado de grano también estuvo asociado a las dosis de fertilización nitrogenada. El llenado de grano a estado lechoso, sucedió primero en los tratamientos que recibieron mayor cantidad de fertilizante nitrogenado, presentando un diferencial de 24 días entre el tratamiento mayor (320 Kg N ha⁻¹) y el tratamiento testigo (0 Kg N ha⁻¹). Al momento de llegar el grano a masa suave, el tiempo entre los tratamientos fue de 19 días. Sin embargo, el grano empezó su estado de masa dura con un diferencial

de tiempo de tan solo 11 días, para madurar casi al mismo tiempo entre los tratamientos evaluados (Cuadro 3).

Cuadro 3. Fenología del cultivo basado en días después de la siembra y unidades calor acumuladas en el cultivo de sorgo bajo dos sistemas de labranza y seis dosis de fertilización nitrogenada.

Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	Masa suave		Masa dura		Madurez fisiológica	
	DDS [£]	UCAs [¥]	DDS	UCAs	DDS	UCAs
0 LC ^α	167	2861	171	2932	176	3032
64 LC	166	2842	169	2897	174	2991
128 LC	157	2649	165	2820	173	2970
192 LC	155	2606	163	2778	170	2914
256 LC	153	2573	165	2820	169	2897
320 LC	148	2461	160	2711	169	2897
128 LM ^β	157	2649	164	2798	172	2950
R ²	0.9254	0.9169	0.7947	0.7942	0.9300	0.9211
Significancia	*	*	*	*	*	*

LC^α: Labranza de conservación; LM^β: Labranza mínima; DDS[£]: Días después de la siembra; UCAs[¥]: Unidades calor acumuladas; Significancia a P<0.05.

6.3 Rendimiento de grano en sorgo

El cuadro 4 muestra la respuesta del cultivo de sorgo bajo labranza cero en el rendimiento de grano a la aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. El cultivo respondió significativamente (P<0.05) en forma lineal positiva a los tratamientos aplicados de fertilización nitrogenada. El índice de cosecha que se obtuvo de la dosis más alta de nitrógeno fue de 1.69 toneladas por hectárea que comparada con el rendimiento promedio del estado de Baja California (4.5 toneladas por hectárea [SIAP, 2013]) disminuyó 62.45 %.

Cuadro 4. Materia seca total, del grano y del follaje y rendimiento de grano en el cultivo de sorgo bajo labranza de conservación y seis dosis de fertilización nitrogenada.

Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	Materia seca (g/5 plantas)			rendimiento (Ton ha ⁻¹)
	Total	Grano	Follaje	
0	267.4	19.9	247.5	0.062
64	279.0	12.0	267.0	0.929
128	363.6	22.0	341.6	1.050
192	314.1	26.4	287.7	1.130
256	459.0	39.0	420.0	1.497
320	348.9	33.3	315.6	1.690
R ²	0.4712	0.7064	0.4111	0.8912
Significancia	*	*	*	*

*: Significancia a P<0.05.

A pesar de ser importante la producción de sorgo, se encuentra limitada por muchos factores bióticos y abióticos. La mayor parte de los estreses enfrentados por las plantas cultivadas están relacionados a las condiciones ambientales (Luna *et al.*, 2005). En el cultivo de sorgo el estrés por alta temperatura afecta negativamente el crecimiento reproductivo, rendimiento y calidad (Diallo, 2012). La máxima disminución (54 %) del porcentaje de sitios reproductivos que producen semillas en sorgo bajo estrés por alta temperatura ocurrió en la floración (Prasad *et al.*, 2008).

La principal justificación a los bajos rendimientos obtenidos (Figura 9), se basan en los datos obtenidos de las figuras 2, 3, 4 y 5, las cuales muestran la cantidad de períodos de estrés por alta temperatura mayor 33° C, la cual estuvo

sometido el cultivo de sorgo durante los 4 meses (mayo, junio, julio y agosto) de su ciclo vegetativo (Prasad *et al.*, 2006).

Otro factor que posiblemente influyó en el rendimiento fue que el riego para germinación en el suelo con textura arcillosa causó encostramiento superficial, esto hizo que la emergencia no fuera uniforme y se redujera la densidad de población (parámetro evaluado visualmente). La emergencia lenta con frecuencia resulta en plantas débiles y baja densidad de población, además de disminuir el rendimiento por unidad de superficie. Antes de la emergencia la planta es totalmente dependiente de las reservas nutritivas del endospermo de la semilla para sobrevivir. La lenta emergencia de las plantas, las expone al agotamiento de estas reservas que son importantes en el crecimiento temprano en los días inmediatamente después de la emergencia (Gerik *et al.*, 1993).

Por otro lado, la figura 10 muestra la diferencia de rendimiento entre el tratamiento de 128 kg N ha⁻¹ bajo LC y el mismo tratamiento bajo LM. Al realizar la comparación entre las medias de cada uno de estos tratamientos, no se encontró diferencia significativa al sistema de labranza efectuado. Aunque al inicio del estudio, la emergencia del tratamiento de LM fue uniforme y vigorosa (Figuras 6, 7 y 8) y con óptima densidad de población (observar las figuras a los 46 DDS) al final del estudio los resultados fueron iguales estadísticamente. Lo mismo sucedió al comparar los rendimientos de materia seca total, materia seca del grano y materia seca del follaje del grupo de cinco plantas que fueron cosechadas (cuadro 5), no encontrándose diferencias estadísticas entre los dos tratamientos.

Cuadro 5. Materia seca total, de grano y de follaje, y rendimiento de grano en el cultivo de sorgo bajo dos sistemas de labranza.

Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	Materia seca (g/5 plantas)			rendimiento (Ton ha ⁻¹)
	Total	Grano	Follaje	
128 LC	363.6	22.0	341.6	1.050
128 LM	367.0	20.9	346.1	1.450
Significancia	NS	NS	NS	NS

NS: No significancia.

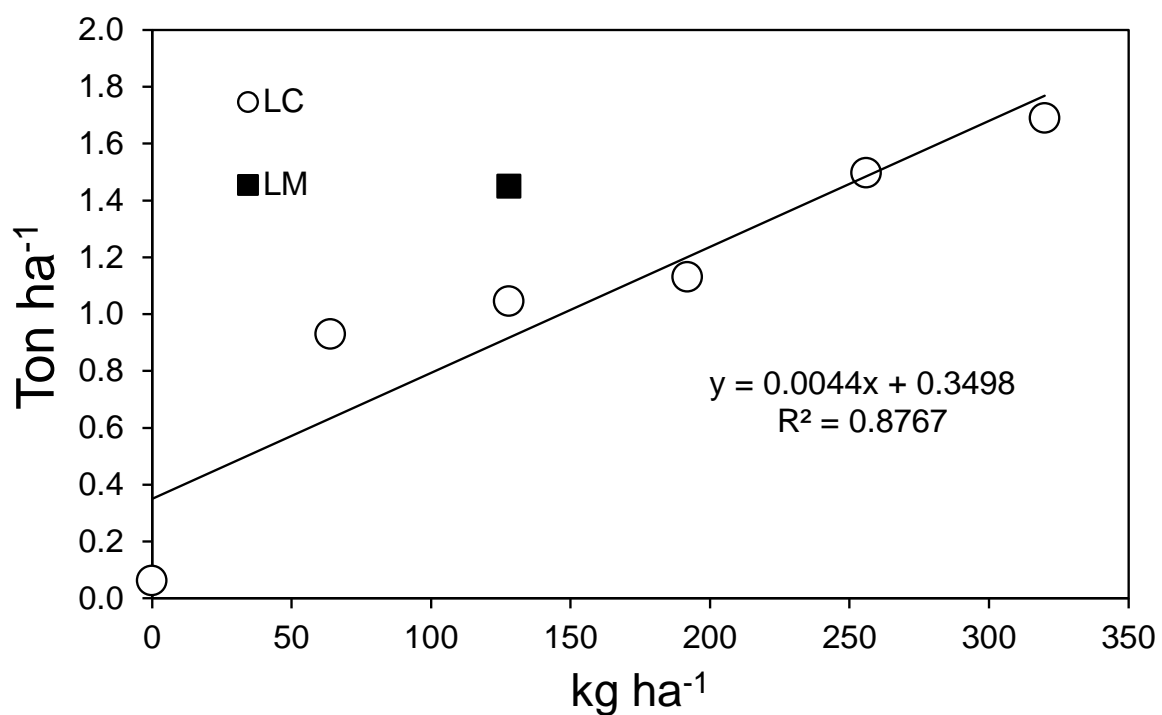


Figura 9. Efecto de la fertilización con nitrógeno en sorgo manejado bajo labranza de conservación (LC) y labranza mínima (LM).

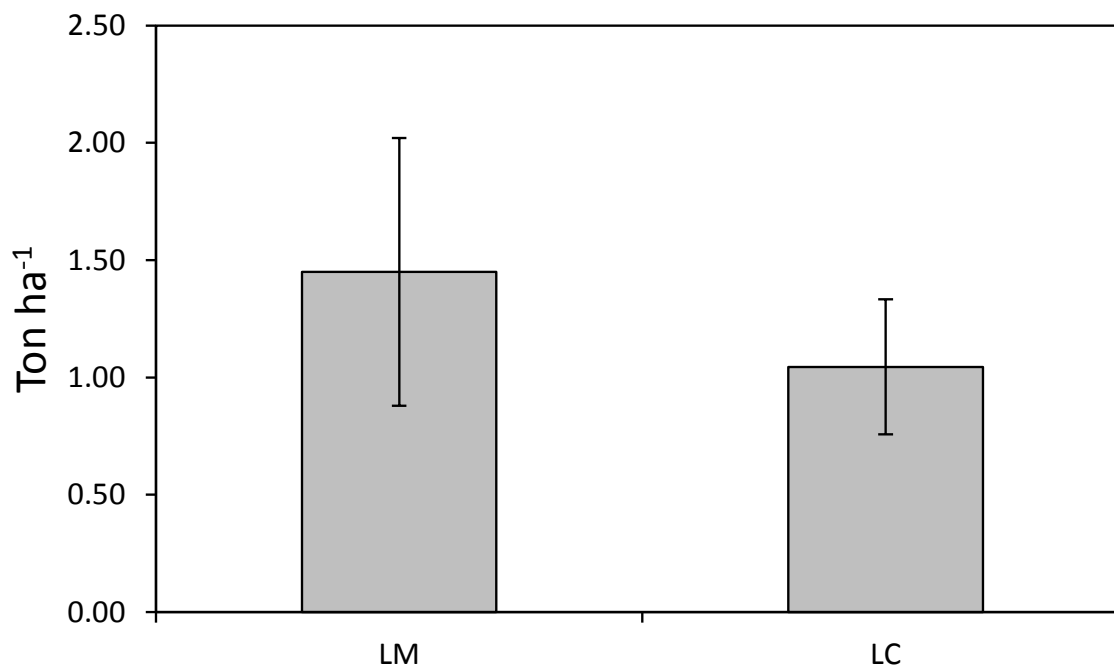


Figura 10. Efecto de la labranza de conservación (LC) y labranza mínima (LM) sobre el rendimiento del cultivo de sorgo.

6.4 Índice SPAD

La utilización del clorofilómetro SPAD 502 ha dado resultados satisfactorios en cuanto a la evaluación del estado nutricional de N en varios cultivos (Sainz y Echeverría, 1998; Caires *et al.*, 2005). El contar con índices de referencia para cultivos desarrollados bajo condiciones específicas de clima y suelo resultan ser una herramienta valiosa para monitorear la nutrición de los mismos (Etchevers, 1999). De ahí la importancia de generar investigación para cada cultivo y condiciones edafoclimáticas en particular (Núñez-Ramírez, 2012).

La figura 11, muestra la relación entre el índice SPAD (80 DDS etapa de crecimiento reproductivo) en sorgo bajo labranza cero y 6 dosis de fertilización nitrogenada con coeficiente de determinación $R^2=0.5657$, y la figura 12 muestra la

relación entre el índice SPAD (127 DDS etapa de floración en tratamiento) en sorgo bajo labranza cero, labranza mínima y 6 dosis de fertilización nitrogenada. En ésta etapa (127 DDS) se observó una estrecha relación cuadrática positiva ($R^2=0.8501$) por lo tanto el comportamiento de los tratamientos (niveles de N) demuestran que el incremento de la aplicación de N trae consigo un incremento en el contenido de clorofila en la planta hasta el valor 38 de Índice SPAD.

Los resultados muestran correlación en las dos mediciones siendo la segunda (etapa de floración) la más estrecha. Martínez y Ocón (2008) informan al respecto: resultados obtenidos mostraron una clara correlación entre las mediciones del clorofilómetro Minolta^R SPAD 502 y el contenido de N en las plantas de sorgo. No obstante éstas fueron más estrechas en la tercera medición ($R^2=0.79$), que corresponde a floración a los 75 DDS. Concluyen que en esa etapa fenológica es el momento óptimo para diagnosticar la deficiencia de N en la planta. Las mejores correlaciones obtenidas a los 75 DDS probablemente se deban a que en ésta etapa la absorción de N por parte de las plantas disminuye y todo el N que ha sido absorbido es dirigido a la floración, etapa que comienza aproximadamente a los 75 DDS, y por otro lado en la etapa de llenado de grano aumenta más la demanda de N por lo que la cantidad translocada dependerá de la cantidad que la planta haya acumulado (Solórzano, 1986).

También, en las plantas de maíz, el contenido de nitrógeno foliar y el contenido de clorofila medido mediante el clorofilómetro SPAD 502 están positivamente correlacionadas, excepto en los estados iniciales de desarrollo del maíz. En situaciones en que la disponibilidad de N es alta, las lecturas del

contenido de clorofila con SPAD 502 y el N foliar son poco correlacionadas, porque el potencial del sistema fotosintético ya se encuentra convirtiendo la energía lumínica en energía química y el excedente de N se encuentra formando parte de otros compuestos de reserva (Argenta *et al.*, 2001; Bullock and Anderson, 1998, Zotarelli *et al.*, 2003).

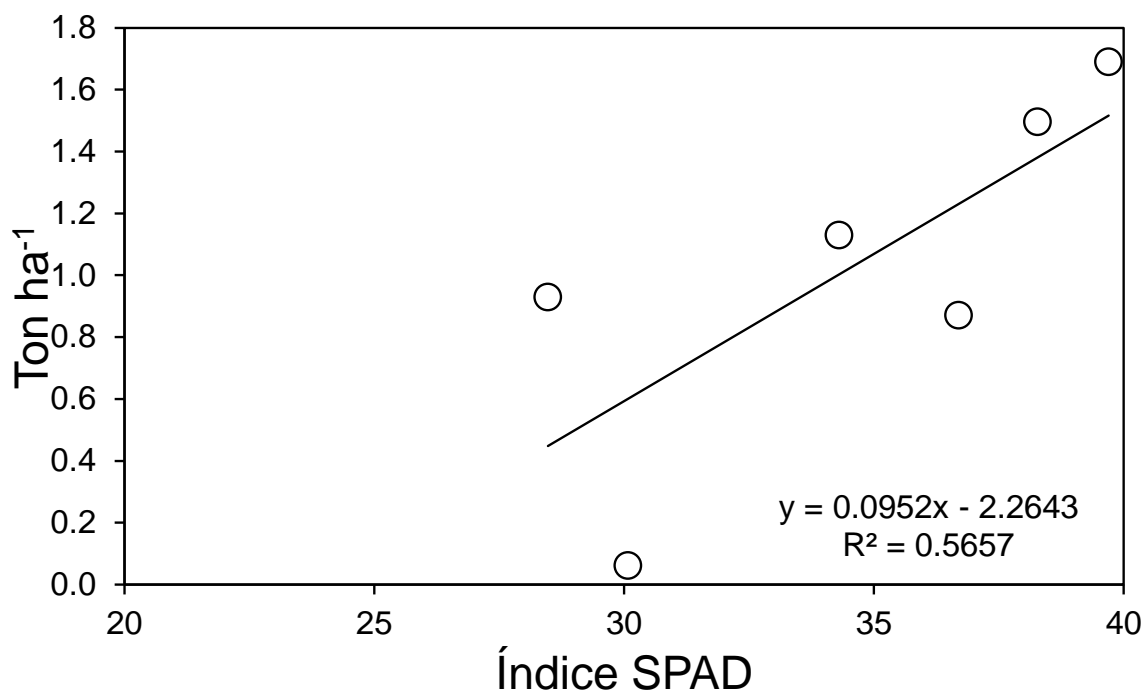


Figura 11. Relación entre el índice SPAD (80 dds) en sorgo bajo labranza de conservación y el rendimiento del cultivo de sorgo.

(Ferrari *et al.*, 2012) informan qué el índice de verdor en sorgo mostró una mayor habilidad para distinguir las dosis de N a medida que avanzó el ciclo del cultivo. Así en el estado de 9-10 hojas se detectó un efecto significativo ($P < 0.05$) de los tratamientos sobre las lecturas de clorofila. En el estado de 6-7 hojas, en cambio, los tratamientos no afectaron las determinaciones ($P > 0.05$). Estos resultados indicarían la conveniencia de emplear esta herramienta de diagnóstico

en un momento más avanzado del ciclo de cultivo, cuando el método presenta una mayor sensibilidad.

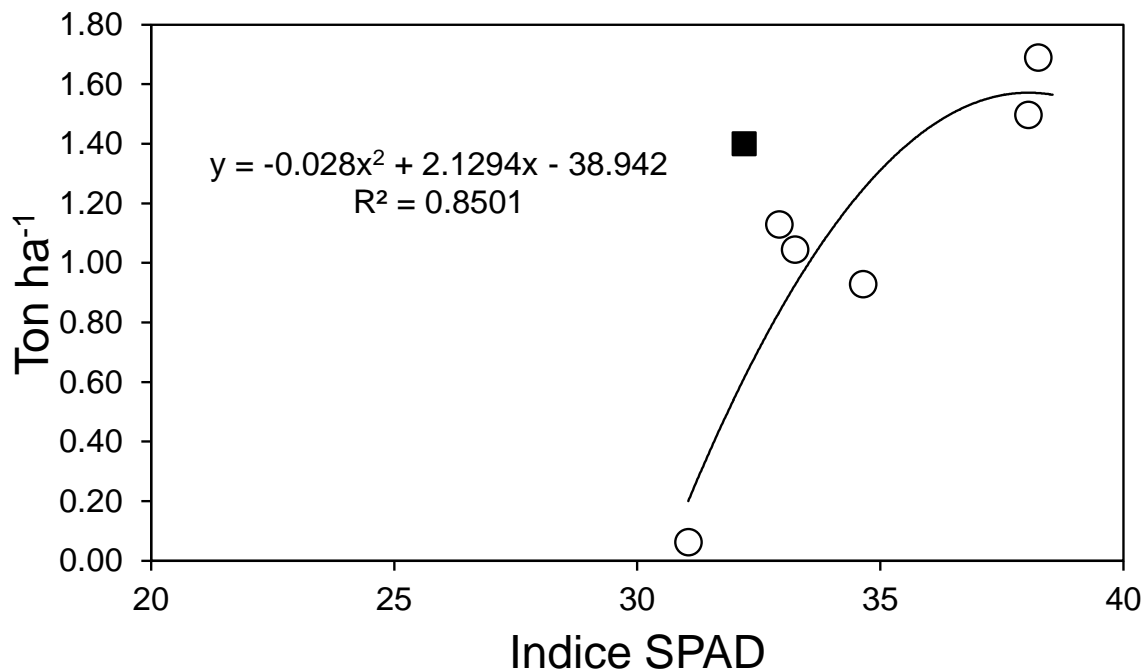


Figura 12. Relación entre el índice SPAD (127 DDS) y el rendimiento del cultivo de sorgo bajo labranza de conservación (LC:○) y labranza mínima (LM: □).

6.5 Nitratos en extracto celular de tallo

La figura 13 muestra la respuesta del cultivo en el contenido de nitratos en extracto celular del tallo a la aplicación de nitrógeno a los 80 dds. El análisis indicó que en esa fecha los nitratos estaban acumulados en forma cuadrática a la dosis de nitrógeno aplicada ($R^2=0.7312$). Esto significa que al incrementar la aplicación de nitrógeno, el cultivo respondió acumulando nitratos en el tallo nivelándose cuando los rendimientos llegaban a los 1.6 ton ha⁻¹ de grano de sorgo, justo a los 440 mg L⁻¹ de NO₃ en el ECT.

La agricultura tradicional tiende lógica y naturalmente hacia la conservación y la precisión. Por lo tanto un eficiente monitoreo del estatus del nitrógeno en la planta y el adecuado manejo del fertilizante nitrogenado son esenciales para equilibrar los siguientes factores: el creciente costo del fertilizante nitrogenado aplicado al cultivo, el requerimiento del cultivo y la necesidad de minimizar las perturbaciones ambientales, ante todo la calidad del agua (Jaynes *et al.*, 2001).

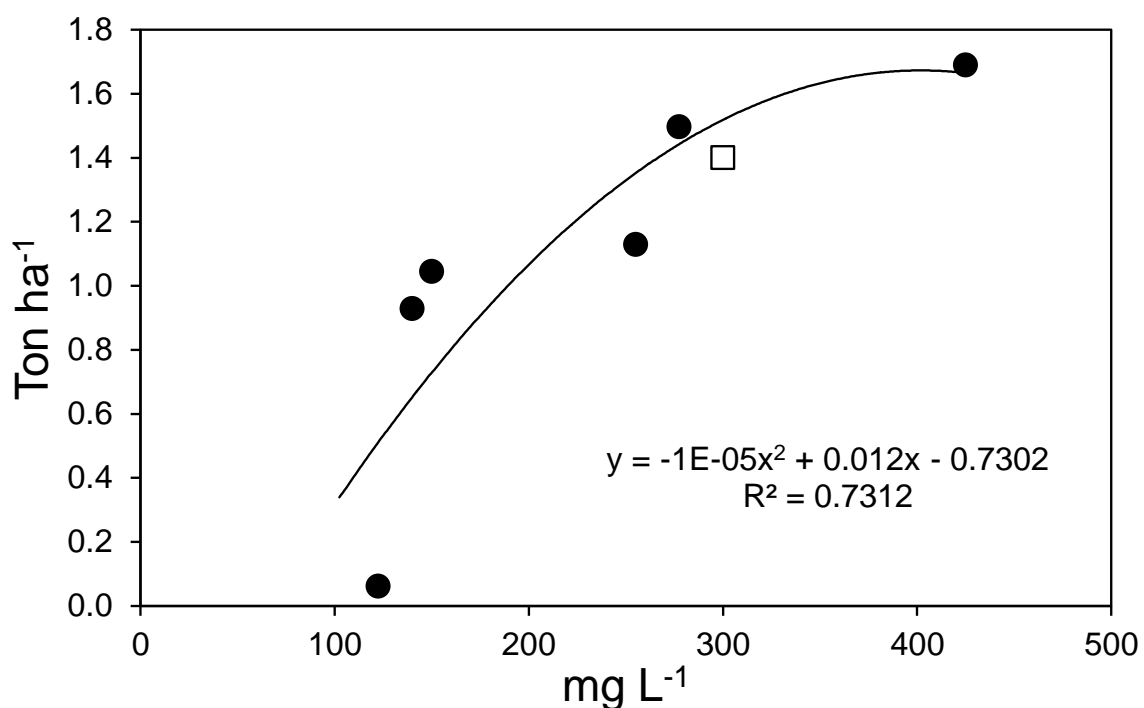


Figura 13. Relación entre la concentración de NO₃ (80 DDS) en el extracto celular de tallo y el rendimiento de sorgo labranza de conservación (LC: ●) y labranza mínima (LM: □).

VII. CONCLUSIONES

- En las variables de crecimiento los tratamientos que tuvieron mayor influencia sobre la altura de la planta fueron: 128 Kg N ha⁻¹ LC, 320 Kg N ha⁻¹ LC y 128 Kg N ha⁻¹ LM.
- La concentración de clorofila se encontró asociada al rendimiento sobretodo en la época de floración (127 DDS).
- La concentración de nitratos en el extracto celular de tallo se encontró asociada en forma cuadrática al rendimiento, encontrando valores de 400 mg L⁻¹ de NO₃ en las parcelas de mayor rendimiento.
- El mayor rendimiento de grano (1.690 Ton ha⁻¹) se logró con la dosis de 320 Kg N ha⁻¹.
- No hubo diferencia estadística en la producción seca total, de grano y de follaje en el cultivo de sorgo bajo los dos sistemas de labranza.
- No hubo diferencia estadística en el rendimiento obtenido en el cultivo de sorgo bajo los dos sistemas de labranza.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abelson, P. H. 1995. Sustainable and the 1995 Farm Bill. *Science* 267:943.
- Amado, T. J. C., Fernández, S. B. y Mielniczuk, J. 1998. Nitrogen availability as affected by ten years of cover crop and tillage systems in southern Brazil. *Journal of soil and water conservation*. 53 (3): 268-271.
- Angeles, J. M. y Rendón, P. 1994. Riego eficiente y labranza de conservación en una rotación trigo-sorgo para Guanajuato. México. 15th World Congress of Soil Science. Vol 7b. Acapulco, Gro. P 127- 128.
- Argenta, G., Ferreira, P., Bortolini, C., Fortshofer, E. L., Strieder, M. L. 2001. Relacao da leitura do clorofilómetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogenio na folha de milho. *Revista Brasileira de Fisiología Vegetal*. 13(2): 134-139.
- Bayer, C. 1996. Dinâmica da materia orgânica em sistemas de manejo de solos. Tese (Douctorado em Agronomia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 214p.
- Benites, J. R. 1992. Clasificación de los sistemas de labranza. *In: FAO. Manual de sistemas de labranza para América Latina. Boletín de suelos* 66. FAO, Roma. Italia. p 7-8.
- Benites, J., Dudal, R. y Koohafkan, P. 1999. Land, the platform for local food security and global environmental protection. *In: FAO. Prevention of land degradation, enhancement of carbón sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the caribbean. Proceedings of the IFAD/FAO Expert Consultation. Rome 15 April 1999. Pp. 37-42.*
- Black, A.L. 1973. Soil property changes associated with crop residue management in a wheat-fallow rotación. *Soil Sci. Amer. Proc.* 37:943-946.
- Blewins, R.L., G.W. Thomas, and P.L. Cornelius. 1977. Influence of no-till and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. *Agron. J.*69:383-386.
- Bullock, D. G. and Anderson, D. S. 1998. Evaluation of the Minolta^R SPAD 502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. *Journal of Plant Nutrition*. 21: 741:755.
- Burle, M. L., Mielniczuk, J. y Focchi, S. 1997. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. *Plant and soil* 190: 309-317.
- Caires N.O.S., Guedes de Carvalho J., Dias M.F.A., Pereira T.R., Pinho P.J. 2005. Uso de SPAD 502 na avialacao dos teores foliares de clorofila, nitrogenio, enxofre, ferro e manganés do algodoneira herbaceo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 40(5): 71-87.

- Calegari, A. y Alexander, I. 1998. The effects of tillage and cover crops on some chemical properties of an oxisol and summer crop yields in southwestern Paraná, Brazil. *Advances in GeoEcology* 31: 1239-1246.
- Calegari, A., Darolt, M. R. y Ferro, M. 1998. Towards sustainable agriculture with a no-tillage system. *Advances in GeoEcology* 31: 1205-1209.
- Castro Filho, C., Muzilli, O. y Podanoschi, A. L. 1998. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das mostras. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 22: 527-538.
- Chowdhury, S.I., and Wardlaw, I.F. 1978. The effect of temperature on kernel development in cereals. *Aust. J. Agric. Res.* 29:205-223.
- Diallo, S. 2012. Effect of genotypes and nitrogen on grain quality of Sorghum. Thesis for the degree Master of Science. Dept. of Agronomy, College of Agriculture, Kansas State University, Manhattan, Kansas. 5 p.
- Doran, J.W. 1980. Soil microbial and biochemical change associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc Am. J.*44:765-771.
- Downes, R.W. 1972. Effect of temperature on the phenology and grain yield of sorghum bicolor. *Aust. J. Agric. Res.* 23:585-594.
- Eckert, D.J. 1987. UAN management practices for no-tillage corn production. *J.Fert. Issues.*4:13-18.
- Erenstein, O. 1999. La conservación de los residuos en los sistemas de producción de maíz en Cd. Guzman y San Gabriel, Jalisco. Documento del NRG 99-01. México, D. F. CIMMYT. 35 p.
- Etchevers, B.J.D., 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutricional de los cultivos. *Terra* 17: 209-219.
- Fageria, N.K., and V.C. Baligar. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plant. *Adv.In Agron.* 88:97-185.
- F.A.O. 1992. Manual de sistemas de labranza para América Latina. Boletín de la FAO 66. Roma, Italia. 193p.
- F.A.O. 2000. Agricultura de Conservación. Estudio de casos en América Latina y África. Boletín de suelos de la F.A.O. No. 78. Roma, Italia. 16-18-19-20 p.
- Faulkner, E. H. 1974. *Plowman's Folly*. Oklahoma University Press. Usa. 138 p
- Ferreira, M. C., Andrade, D.S., Chueire, L. M. O., Takemura, M. y Hungría, M. 2000. Tillage method and crop rotation effects on the population sizes and diversity of bradyrhizobia nodulating soybean. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 627-637.
- Figueroa, S.B. y F.J. Morales F. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Colegio de Posgraduados. SARH. Montecillos, México. 273 p.

- Ferrari, M., Rivoltella, L. A., Casado, J. M. (2012) Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización nitrogenada en sorgo granífero. Trabajo presentado en el XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo – XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 de Abril de 2012, Mar del Plata, Argentina p.9.
- Financiera Rural. 2013. Monografía del Sorgo Grano. Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial. Dirección Ejecutiva de Análisis Sectorial.
[http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Monografias/MonografiaSorgo\(jun11\).pdf](http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Monografias/MonografiaSorgo(jun11).pdf)
- Fox, R.H., and W.P. Piekielek. 1987. Comparison of surface application methods of nitrogen solution to no-till corn (*Zea mays* L.). J.Fert. Issues 4:7-12.
- Gerik, T., Bean, B., Vanderlip, R. 1993. Sorghum growth and development. Texas Cooperative Extension. The Texas A&M University System 2p.
- Gordon, W.B., and D.A. Whitney. 1995. No-tillage grain sorghum response to starter nitrogen-phosphorus combinations. J. Prod. Agric. 8:369-373
- Gosh, B. C., and R. Bath. 1998. Environmental hazards of nitrogen loading in wetland rice elds. Environm Pollut. 102 Suppl. 1:123-126.
- Greenland, D. J. y Adams, D. 1992. Organic matter in the soils of the Tropics – From myth to complex reality. In: Myths and science of soils in the tropics. SSSA Special publication No. 29.
- Hamblin, A. 1995. The concept of agricultural sustainability. In: Andrews, J.H. and I. Tommerup (ed). Advances in Plant Pathology. Vol. 11 Academic Press, New York. PP 1-19.
- Hawkins, T.S., E.S. Gardiner y G.S. Comer. 2009. Modeling the Relationship Between Extractable Chlorophyll and SPAD-502 Readings for Endangered Plant Species. Research Journal of Nature Conservation. 17:125-129.
- Heckman, J.R., R. Samulis, P. Nitzsche. 2002. Sweet Corn Crop Nitrogen Status Evaluation by Stalk Testing. Hortscience 37(5):783-786.
- Hochmuth, G. J., P. R. Gilreath, E. A. Hanlon, G. A. Clark, D. N. Maynard, C. D. Stanley, and D. Z. Hamon. 1988. Evaluating plant N status with plant sap quick-test kits. Proc. Tomato Institute. Fla. Coop. Ext. Serv. Spec. Series. SS-VEC 801:6-14.
- Huang, J., F. He, K. Cui a, R.J. Buresh, B. Xu, W. Gong, S. Peng . 2008. Determination of Optimal Nitrogen Rate for Rice Varieties Using a Chlorophyll Meter. Field Crops Research 105:70–80.
- Hungría, M., Andrade, D. S., Balota, E. L., Collozzi-Filho, A. 1997. Importância do sistema de semeadura directa na população microbiana do solo. EMBRAPA-CNPSO, Londrina, Brazil. Comunicado Técnico, 56. 9p.

- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias(INIFAP). 2010. Guía técnica para el área de influencia del Campo Agrícola Experimental Valle de Mexicali. Mexicali, B.Cfa., México. p. 12.
- Ismail, I., R.L. Blevins, and W.W. Frye. 1994. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.* 58:193-198.
- Jaynes, J.B., T.S. Colvin, D.L. Karlen, C.A. Cambardella and D.W. Meek. 2001. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate *J. Environ. Qual.* 30:1305-1314.
- Jiménez, D.R.M. y J. Lamo, E. 1998. *Agricultura sostenible*. Mundi-Prensa, España. 616 p.
- Kessel, C. V., D.J. Pennock, and R.E. Farrel. 1993. Seasonal variation in denitrification and nitrous oxide evolution at the landscape scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:988-995.
- Khosla, R. Alley, M.M. and Davis, P.H. 2000. Nitrogen Management in No-Tillage Grain Sorghum Production: I. Rate and Time of Application. 92:321–328. *Agronomy Journal*
- Kiniry, J.R., and R.L. Musser. 1988. Response of kernel weight of Sorghum to environment early and late in grain filling. *Agron. J.* 80:606-610.
- Lal, R. 1999. Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use. In: FAO. Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. Proceedings of the IFAD/FAO Expert Consultation. Rome 15 April 1999. Pp. 45-52.
- Luna, C.M., G.M. Pastori, S. Driscoll, K. Groten, S. Bernard, and C.H. Foyer. 2005. Drought controls on H₂O₂ accumulation, catalase CAT activity and CAT gene expression in wheat. *J. Exp. Bot.* 56:417- 423
- Malhi, S.S., C.A. Grant, A.M. Johnston, K.S. Gill. 2001. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. *Soil & Tillage Research* 60:101–122
- Martínez G. L. P. y Ocón J. P. P. (2008) Utilización del clorofilómetro SPAD 502 para diagnosticar la deficiencia del nitrógeno en sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) bajo distintas dosis de nitrógeno. Tesis para adoptar el título de Ingeniero Agrónomo Generalista. Universidad Nacional Agraria. Managua h. 43-46.
- Matlon, P.J. 1990. Improving Productivity in Sorghum and Pearl Millet in Semi-Arid África. *Food Research Institute Studies*, Vol. XXII, No.1, 1990.
- Menguel, D.B., D.W. Nelson., and D.M. Huber. 1982. Placement of nitrogen fertilizers for no-till and conventional till corn. *Agron. J.*74:515-518
- Maití, R.K. 1996. *Sorghum science*. Science Publishers, Lebanon, N.H., U.S.A.

- Mosier, A.R., and J.K. Syers. 2004. Nitrogen fertilizer: an essential component of increased food, feed and fiber production In *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment* A.R. Mosier, J.K. Syers and J.R. Freney, eds. SCOPE, Island Press, Washington DC 65:3-15.
- Muchow, R.C. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and and sorghum in a semiarid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Res.* 18:17–30.
- Muchow, R.C. 1998. Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. *Field Crops Res.* 56:209–216.
- Navarro, B.A., B. Figueroa S., V. M. Ordaz Ch. y F. V. González C. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *TERRA.* 18(1):61-70.
- Nimji, P. M., and A.P. Gandhi. 1993. Effect of maturity stage and fertilization on yield and grain quality of sorghum. *Indian J. Agron.* 38:562-568
- Nobel,P.S., L.J. Zaragoza, and W.K. Smith. 1975. Relation between mesophyll surface area, photosynthetic rate, and illumination level during development for leaves of *Plectranthus parviflorus* Henckel. *Plant Physiol.* 55:1067-1070.
- Núñez-Ramírez, F. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y calidad en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) Tesis de grado: Doctor en Ciencias Agropecuarias. Instituto de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma de Baja California 6-8 p.
- Patel, G.N., P.G. Patel, and J.C. Patel. 1994. Effect of nitrogen and phosphorus on yield and quality of forage sorghum (*Sorghum bicolor*). *Indian Journal Agronomy* 39:123-125.
- Pérez, J. P. y J. Velazquez. 1997. Interacción labranza – fertilización – residuos en maíz de temporal en la región centro de México. In: *Avances de Investigación en Labranza de Conservación I.* Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible. INIFAP. Libro técnico No. 1 pp. 123-135
- Phillips, R.E., R.L. Blevins, G.W. Thomas, W.W. Frye, and S.H. Phillips. 1980. No-tillage agriculture. *Science* 208:1108-1113.
- Pimentel, D., C. Hervey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S.Crist, L. Shprits, L. Fitton, R.Saffouri y R. Blair. 1995. Environmental and Economic Costos of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science* 267(24):117-1122.
- Post, W. M., T.H. Peng, W.R. Emanuel, A. W. King, V. H. Dale and D. L. DeAngelis. 1990. The global carbon cycle. *Am. Scientist.* 78:310-326.
- Potter, K. N., J. E. Morrison, Jr., and H. A. Torbert . 1996. Tillage Intensity Effects on Com and Grain Sorghum Growth and Productivity on a Vertisol. *J. Prod. Agric.* 9:385-390

- Prasad, P.V.V., Boote K.J., and Allen, L.H. Jr. 2006. Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield and harvest index of grain Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] are more severe at elevated carbón dioxide due to higher tissue temperatures. *Agric. For. Meteorol.* 139:237-251
- Prasad, P.V.V., Pisipati, S.R., Mutava,R.N., and Tuinstra, M.R. 2008. *Crop Sci.* 48:1911-1917.
- Rashid, A., R.U. Khan, and H. Ullah. 2008. Influence of Nitrogen Levels and Application Methods on Yield and Quality of Sorghum ISSN 1002-0160/CN 32-1315.
- Raun, W.R., and G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production *Agron J.* 91:357-363.
- Reicosky, D. C. and M. J. Lindstrom. 1993. Fall tillage method: Effect on short-term carbón dioxide flux from soil. *Agron. J.* 85: 1237-1243.
- Sainz R.H., Echeverría H.E., 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta^R SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento del grano. *Revista de la Facultad de Agronomía.* 103(1):37-44.
- Shaahan, M.M., A.A. El-Sayed, E.A.A. A. El-Nour. 1999. Predicting Nitrogen, Magnesium and Iron Nutritional Status in Some Perennial Crops Using a Portable Chlorophyll Meter. *Scientia Horticulturae* 82:339-348
- Sheehy, J.E., M.J.A. Dionora, P.L. Mitchell, S. Peng, K.G. Cassman, G. Lemaire., and R.L. Williams. 1998. Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. *Field Crops Resea*, 59:31-41.
- SIAP. 2013. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Producción agrícola. Ciclo: Ciclicos y Perennes 2012. http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=245
- Solórzano P. R. 1986. Efecto de dos niveles de nitrógeno y poblaciones sobre el rendimiento de sorgo granífero y sobre la acumulación y distribución de nitrógeno en la planta. *Venezuela.* Pag. 301-312.
- Stevenson, F. J. 1985. The nitrogen cycle in soil: Global and ecological aspects. In Stevenson, F. J. ed. *Cycles of Soils.* A Wiley Interscience Publication. Wiley, New York, USA. pp 106-153.
- Testa, V. M.,Teixeira, L. A. J. y Mielniczuk, J. 1992. Características químicas de um Podzólico vermelho-escuro afectadas por sistemas de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 16: 107-114.
- Tiscareño, L. m. and A. D. Baez G. 2000. Climate fenomena and soil degradation In: Quintero, L. R., T. Reyna T., L. Corlay Ch., A. Ibañez H. y N. E. García C. *La Edafología y sus perspectivas al Siglo XXI.* Tomo I. Colegio de Postgraduados, UNAM, UACH. México.

- Tripathi, R.Y., and S. Bhan. 1995. Effect of level and method of nitrogen application and moisture conservation practices on growth and yield of rainfed sorghum (*Sorghum bicolor*) under light textured, eroded soils of central Uttar Pradesh. *Indian J. Agron.* 40: 47-50.
- Unger, P. W. 1988. Sistemas de labranza para la conservación del suelo y del agua. *Boletín de suelos de la FAO* 54. Roma, Italia.
- Vanderlip, R.L. 1993. How a sorghum plant develops. Cooperative Extension Service. Contribution No.1203, Kansas Agricultural Experiment Station, Manhattan, Kansas.
- Velásquez, V. M. A., M. Tiscareño, L., R. Claverán, A. y M. Gallardo V. 1997. Erosión y productividad bajo labranza de conservación. Avances de investigación en suelo de Ando en Michoacán. Folleto Técnico No. 1. Morelia, Mich., México. 34p.
- Voss, M. y Sidirias, N. 1985. Nodulação da soja em plantio direto em comparação com plantio convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 20: 775-782.
- Wilson, E.T. 1978. Pioneer agricultural explosion in CO₂ levels in the atmosphere. *Nature.* 273:40-41.
- Williams, P.H. 1998. Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. *Field Crops Res.* 59:31-41
- Zhao, D., K. Raja-Reddy, V. Gopal-Kakania, V.R. Reddy. 2005. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *Europ. J. Agronomy* 22:391-403
- Zotarelli, L., García, C., Piccinin, J.L., Urquiaga, S., Boddey, R. M., Torrez, E., Rodríguez, B. J. 2003. Calibracao do medidor de clorofila Minolta^R SPAD 502 para avaliacao do conteudo de nitrogenio do milho. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 38 (9): 1117-1122.