



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLOGÍA VEGETAL**

**DOSIS DE NITRÓGENO Y FECHA DE SIEMBRA
EN LA MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO
DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.)
EN EL NORTE DE SINALOA**

CARLOS PATRICIO SAUCEDA ACOSTA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2010

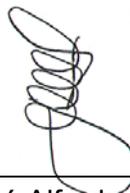
La presente tesis titulada: **DOSIS DE NITRÓGENO Y FECHA DE SIEMBRA EN LA MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN EL NORTE DE SINALOA**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

ESPECIALISTA EN FISIOLÓGÍA VEGETAL

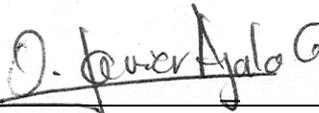
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



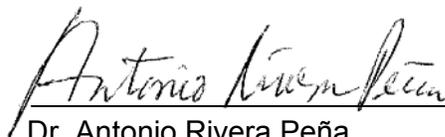
Dr. José Alfredo Carrillo Salazar

ASESOR



Dr. Oscar Javier Ayala Garay

ASESOR



Dr. Antonio Rivera Peña

ASESOR



Dr. Refugio Villegas Cota

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)

Al Colegio de Posgraduados (COLPOS)

A la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS)

A los Integrantes de mi Consejo Particular. A todos muchas gracias por su apoyo y comprensión.

Dr. Alfredo Carrillo Salazar

Dr. Oscar Javier Ayala Garay

Dr. Antonio Rivera Peña

Dr. Refugio Villegas Cota

Al Instituto de recursos Genéticos y Productividad de Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

Al Dr. Víctor A. González Hernández

Al Dr. Víctor Conde Martínez

Al M. C. Franklin G. Rodríguez Cota

DEDICATORIA

A todas las grandes mujeres que amo con todo mi ser.

A mi adorada hija Marialy Saucedá Ramos, la razón de mi vida.

A mi esposa Virginia Ramos por todo.

Mi Mamá Susana Acosta Lugo

Mi tía Alejandrina Acosta Lugo

Mis queridas hermanas, Victoria, Maximina, Elvia y Honorelia.

A todos los grandes hombre que quiero con cariño y respeto.

Mi papa Raúl Saucedá Galaviz

Mi tío José A. Acosta Lugo

A mis Hermanos, Raúl H. e Inés

A todos mis amigos y compañeros; en especial a Benjamin Hernández Vázquez, Hugo Ramírez Tobías, Dagoberto Fierro Corrales, Mariana Palma Tenango, Gabriel Lugo García.

INDICE GENERAL

	Pág.
INDICE DE CUADROS	i
INDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN.....	iv
SUMMARY	vi
I. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos	4
1.2 Hipótesis.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1. Origen	5
2.2. Importancia	5
2.3. Factores que afectan el desarrollo del cultivo de la papa.....	6
2.3.1. Temperatura.....	8
2.3.2. Radiación en la banda fotosintética.....	9
2.3.3. Nitrógeno.....	10
2.4. Fenología	12
2.5. Área foliar específica	15
2.6. Índice de área foliar	16
2.7. Coeficiente de extinción	19
2.8. Fracción de radiación interceptada en la banda fotosintética (FRI)	20
2.9. Índice de Cosecha y contenido materia seca de los tubérculos	21
2.10. Eficiencia en el uso de la radiación	23
2.11. Modelación	26
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1. Sitio experimental	29

3.2. Datos meteorológicos.....	29
3.3. Genotipos	30
3.4 Tratamientos.....	30
3.5. Diseño experimental y tamaño de parcela.....	31
3.6. Método de siembra y densidad de población.....	31
3.7. Prácticas de manejo	32
3.9. Variables evaluadas	33
3.9.1 Fenológicas.....	33
3.9.2. Crecimiento.....	34
3.9.2.1. Grados días de desarrollo (GDD).....	34
3.9.2.3. Distribución de biomasa.	35
3.9.3. Eficiencia fisiológica	35
3.9.3.1. Índice de área foliar (IAF). Esta variable se obtuvo mediante muestreos destructivos y no destructivos.....	35
3.9.3.2. Coeficiente de extinción (k).	36
3.9.3.3. Área foliar específica (AFE). Se determino en cm^2 por g, con la formula propuesta por Hunt (1982):.....	36
3.9.3.4. Fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada.....	37
3.9.3.5. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética (EUR). La EUR se calculó con base en el modelo de Monteith (1977) para calcular la acumulación de biomasa:.....	37
3.9.3.6. Índice de cosecha (IC).	38
3.9.3.7. Contenido de materia seca de los tubérculos (MST).	38
3.9.4. Rendimiento (REN)	38
3.9.6. Análisis estadístico	39

3.9.6. Componentes del modelo.....	39
3.9.7. Creación del Modelo.....	42
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1. Condiciones ambientales	46
4.2. Etapas fenológicas	48
4.3. Índice de Área Foliar (IAF)	51
4.5. Área foliar específica (AFE).....	54
4.8. Coeficiente de extinción (k)	56
4.6. Fracción de radiación interceptada en la banda fotosintética (FRI)	57
4.7. Acumulación de Biomasa	61
4.9. Eficiencia en uso de la radiación en la banda fotosintética (EUR)	62
4.10. Índice de cosecha (IC).....	64
4.11. Contenido materia seca de tubérculo	65
4.12. Rendimiento (REN)	66
4.12.1. Calidad del tubérculo.....	68
4.13. Resultados del modelo de papa.....	72
V. DISCUSION GENERAL.....	75
VI. CONCLUSIONES	78
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	80

INDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Características del material genético utilizado.....	30
Cuadro 2. Numero de tratamientos, fechas de siembra, variedades y dosis de nitrógeno.....	31
Cuadro 3. Código de tamaño de tubérculo de acuerdo a la Norma Mexicana de Calidad de la Papa NMX-FF-022-SCFI-2002.	39
Cuadro 4. Principales fases fenológicas de tres variedades de papa, en dos fechas de siembra, cultivadas en condiciones de riego. Guasave, Sinaloa, México. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	51
Cuadro 5. Índice de cosecha y contenido de materia seca en tubérculos (MST) en dos fechas de siembra, cuatro dosis de nitrógeno y tres variedades de papa. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	70
Cuadro 6. Número de tubérculos de papa por categorías de calidad en dos fechas de siembra, en las variedades FL-1867, Atlantic y Alpha. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	73
Cuadro 7. Porcentaje de rendimiento de tubérculos de papa por categoría de calidad en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	75
Cuadro 8. Rendimientos observados y simulados en la SFS bajo cuatro dosis de nitrógeno y tres variedades de papa. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	78

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de modelo de crecimiento de papa en función de la fecha de siembra, dosis de nitrógeno, los grados día de desarrollo y la radiación solar.	45
Figura 2. Diagrama del submodelo de la demanda de agua en papa.....	46
Figura 3. Diagrama del submodelo de la demanda de nitrógeno en papa.	47
Figura 4. Variables meteorológicas registradas en la estación automatizada Batequis en el Campos Experimental Valle del Fuerte.....	50
Figura 5. Índice de área foliar de tres variedades de papa en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	54
Figura 6. Índice de área foliar máximo de tres variedades de papa en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.	55
Figura 7. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre el IAF máximo en tres variedades de papa, en la A) PFS (30-10-2007) y B) SFS (20/11/2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	56
Figura 8. Relación entre la dosis de nitrógeno y el AFE. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.	58
Figura 9. Coeficiente de extinción de luz de tres variedades de papa en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.	59
Figura 10. Relación entre el IAF y el k. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	59
Figura 11. FRI máxima de tres variedades de papa en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo O-I. 2007/2008.....	61

Figura 12. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre la FRI máxima de tres variedades de papa. A) PFS (30/10/2007) y B) SFS (20/11/2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo: O-I.2007/2008.....	63
Figura 13. Relación entre el IAF y la FRI de tres variedades de papa. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.	63
Figura 15. Acumulación de biomasa en función de la RFAI acumulada de tres variedades de papa y cuatro dosis de N. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	65
Figura 14. Relación entre FRI y k. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	64
Figura 16. EUR en tres variedades de papa en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	67
Figura 17. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre la EUR de tres cultivares de papa en la: A) PFS (30/10/2007) y B) SFS (20/11/2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.	68
Figura 18. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre el rendimiento de tres cultivares de papa en la: A) PFS (30/10/2007) y B) SFS (20/11/2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	72
Figura 19. Rendimiento de papa por categorías de calidad en tres cultivares en: A) PFS (30 de octubre de 2007), B) SFS (20 de noviembre de 2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.....	74
Figura 20. Calidad del tubérculo de papa y dosis de nitrógeno en la A) PFS (30 de octubre de 2007) y B) SFS (20 de noviembre de 2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008	76

RESUMEN

Con el objetivo de identificar las principales variables que determinan el rendimiento de tubérculo de papa e integrarlas en un modelo de simulación simple del crecimiento y rendimiento, en esta investigación se estudió el efecto de dos fechas de siembra (30/10/2007 (PFS) y 20/11/2007 (SFS) y fertilización nitrogenada (0, 100, 200 y 300 kg N ha⁻¹) en la fenología del cultivo, índice de área foliar (IAF), área foliar específica (AFE), fracción de radiación interceptada (FRI), eficiencia en el uso de la radiación (EUR), coeficiente de extinción de luz (k), contenido de materia seca de los tubérculos (MST), índice de cosecha (IC) y rendimiento de tubérculo (REN, t ha⁻¹) de papa cv. FL-1867, Atlantic y Alpha, en el Valle del Fuerte, Sinaloa, México. El diseño experimental fue bloque al azar, con arreglo factorial. El mayor IAF ocurrió en floración y se correlacionó con la FRI ($R^2 > 0.94$, $P < 0.01$). El k y la FRI presentaron una relación directamente proporcional ($R^2 = 0.59$, $P < 0.01$). Se observaron diferencias entre fechas de siembra para el IAF ($P < 0.05$), FRI y REN ($P < 0.01$). El REN fue superior en PFS con 31.8 t ha⁻¹ mientras que en la SFS fue 28.7 t ha⁻¹ ($DMS_{Tukey.01} = 1.6$). También el IAF fue mayor en la PFS (3.66) que en la SFS (3.43) ($DMS_{Tukey.05} = 0.19$). El cultivar FL-1867 presentó el IAF más bajo (2.41) en la SFS y sin aplicación de nitrógeno mientras que Alpha fue el cultivar con el mayor IAF (4.41) en la PFS y con 300 kg N ha⁻¹. La FRI fue 10 % mayor en la PFS en los tres cultivares, y Alpha fue la que presentó la mayor FRI. Se observaron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) de las dosis de N en el AFE, que decreció conforme incrementó la disponibilidad de N. El IAF y FRI incrementaron con conforme al aumento de N. No se observaron diferencias en REN ni IC por efecto de la dosis de N. La disminución de IAF, FRI y REN en la

SFS se atribuye al efecto de bajas temperaturas (entre 2 y 5 °C). Se observó efecto de la dosis de nitrógeno en la EUR, pero no del cultivar ni la fecha de siembra. El modelo predice el rendimiento con un error medio de 2.2 % en la PFS, y 42.7% en la SFS. En cambio, el error es de 12.1 a 29.8 % cuando se determina con base en el efecto de la dosis de nitrógeno. Las diferencias entre el REN observado y modelado fue 4.7, 0.4 y 4.0 % para los cultivares FL-1867, Atlantic y Alpha respectivamente.

Palabras clave: *Solanum tuberosum* L., modelo de simulación, dosis de nitrógeno, fecha de siembra.

SUMMARY

The aim of this research was to determine the effect of planting date (30/10/2007 and 20/11/2007) and nitrogen fertilization (0, 100, 200 y 300 kg N ha⁻¹) on crop physiological indexes, phenology, dry weight and yield of potato cv FL-1867, Atlantic and Alpha in El Valle del Fuerte, Sinaloa, Mexico. The experiment was set in a factorial in a randomized blocks design. The highest leaf area index (IAF) was observed during flowering and it correlated to the fraction of intercepted radiation (FRI) ($R^2 > 0.94$, $P < 0.01$). k and FRI were correlated ($R^2 = 0.59$, $P < 0.01$). Differences between planting dates were detected ($P < 0.01$) on IAF, FRI and tuber yield (REN, t ha⁻¹). REN was higher in PFS (31.8 t ha⁻¹) than in the SFS (28.7 t ha⁻¹) (DMS_{Tukey.01} = 1.6). Also, IAF was higher PFS (3.66) than in the SFS (3.43) (DMS_{Tukey.05} = 0.19). FL-1867 produced the lowest IAF (2.41 m²/m²) under the second planting date and without nitrogen fertilization while Alpha reached up to 4.41 m²/m² in the first planting date at 300 kg N ha⁻¹. FRI was 10% higher in the PFS in all the cultivars, where Alpha produced the highest FRI. AFE decreased as N increased, while IAF and FRI decreased proportionally to N dose. Neither REN nor IC was affected by the nitrogen level. Reduction in IAF, FRI and REN in the second planting date is attributed to low temperatures (entre 2 y 5 °C). Nitrogen level affected the EUR ($P < 0.05$). The model forecast potato yield with 2.2% and 42.7% error in PFS and SFS respectively. However, the effect of nitrogen dose on tuber yield was in the range from 12.1 to 29.8 %. Errors in modeling REN were 4.7, 0.4 and 4.0% for FL-1867, Atlantic and Alpha.

I. INTRODUCCION

El rendimiento de papa en el norte de Sinaloa es de 23 t ha⁻¹ en promedio (SIAP, 2008), aunque algunos agricultores obtienen hasta 40 t ha⁻¹; esto es evidencia de la variabilidad de condiciones edáficas, infraestructura de riego, el clima y las prácticas agrícolas utilizadas. Sin embargo, la región es una de las más productivas en México, y con sus recursos es posible alcanzar el potencial de rendimiento. Para esto es relevante conocer las variables principales que determinan el rendimiento de tubérculo y cómo interactúan entre ellas, a través de estudiar la fisiología, genética y nutrición vegetal, las relaciones entre la planta y su ambiente, además de tener presente el impacto de las prácticas agrícolas en los diferentes procesos biológicos.

La variación en el rendimiento de papa esta influenciada tanto por la radiación solar como por la temperatura. En particular, la temperatura determina la duración del ciclo del cultivo, induce la tuberización e influye en la acumulación de carbohidratos y materia seca de los tubérculos (Soboh *et al.*, 2000). Así mismo, otras características influyen en el rendimiento, como la capacidad de los genotipos para absorber radiación fotosintéticamente activa, la eficiencia en el uso de la radiación interceptada para producir materia seca y por el índice de cosecha (Charles Edwards, 1982; Pashiardis, 1987; Spitters, 1987; van Delden, 2001).

Cuando sólo la temperatura y la radiación solar interceptada son los factores que determinan la tasa de crecimiento, y no hay limitación de agua,

nutrientes ni plagas, enfermedades o malezas, entonces es posible acercarse a obtener el rendimiento potencial de un cultivar (van Heemst, 1986). En cambio esto deja de ser lineal cuando se aplican algunas prácticas agrícolas como son la fertilización o se cambia la fecha de siembra. En particular la fertilización nitrogenada y la fecha de siembra tienen efecto en la intercepción y en la eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa, ya que impactan en el tamaño y la duración del aparato fotosintético (Charles Edwards, 1982; Sinclair y Horie, 1989; McCullough *et al.*, 1994).

Pero en papa no sólo se requiere proveer al cultivo de suficiente nitrógeno, sino que también se debe evitar los excesos ya que esto puede prolongar el crecimiento vegetativo, retrasar el inicio de tuberización, reducir el rendimiento (Vos y Biemond, 1992; Saluzzo *et al.* 1999) y además afectar el índice de cosecha (Ojala *et al.* 1990; Cieslik 1997; Charles Edwards, 1982).

Estas variables y relaciones descritas pueden integrarse en un modelo de simulación con la finalidad de proceder al entendimiento del sistema. Los modelos de simulación aplicados a cultivos agrícolas pueden ser relativamente simples cuando se asume una relación lineal entre la absorción de la radiación solar y la producción de biomasa (Monteith, 1994) y entonces se modela la productividad bajo condiciones óptimas de crecimiento de un cultivo. En papa se han desarrollado diversos modelos de crecimiento, desarrollo y rendimiento que aplican este principio (Ingram y McCloud, 1984; Haverkort y Harris, 1987; Jefferies y Heilbronn, 1991; Griffin *et al.*, 1993).

En cambio, otros modelos consideran un número mayor de variables como son: El modelo israelita ISPOTA (1984-1985), y el modelo holandés WOFOST (World Food Studies, 1988) orientados para modelar estrés hídrico; el modelo holandés SWACROP (Soil Water and Crop Production) que estima el efecto del déficit hídrico en el rendimiento potencial en ambientes templados o semi-desérticos; el modelo finlandés CROPWANTN (1988) modela la producción de papa con base en el déficit hídrico o de nitrógeno en la planta; el modelo estadounidense SUBSTOR (Simulate Underground Bulking Storage Organs, 1981) modela producción, balance de agua y nitrógeno; y el modelo mexicano MSPEC-PAPA (1998) estima el rendimiento potencial de tubérculo en diferentes ambientes de producción.

Estos modelos integran información de clima, suelo y planta; algunos son relativamente simples pero también existen muy complejos. Su empleo se dificulta ya que se han desarrollado generalmente en otros países bajo condiciones ambientales, de manejo y de genotipos particulares. Además, es frecuente que incluyan un número grande de variables y/o parámetros que son difíciles de obtener, por lo que es necesario crear modelos de acuerdo a nuestras necesidades y condiciones de producción.

Debido a lo anterior se propone crear un modelo simple que considere el efecto de la fertilización nitrogenada y la fecha de siembra en el rendimiento de papa en la región del norte de Sinaloa, con el propósito de identificar el origen de la diferencia entre el rendimiento real y el potencial.

1.1. Objetivos

1.1.1. Evaluar el efecto de la fecha de siembra y dosis de nitrógeno en la fenología, fisiología y rendimiento de papa en el norte de Sinaloa.

1.1.2 Modelar el rendimiento potencial de papa en función de la dosis de nitrógeno y la fecha de siembra.

1.2 Hipótesis

1.2.1. La fenología, fisiología y rendimiento en papa difieren entre genotipos.

1.2.2. El rendimiento de papa en la siembra realizada en noviembre es mayor que el de la siembra en octubre, debido a que las condiciones ambientales favorecen el desarrollo del cultivo.

1.2.3. Al incrementar la dosis de nitrógeno hasta un óptimo, aumenta el índice de área foliar, la intercepción de radiación fotosintéticamente activa, la eficiencia en el uso de la radiación interceptada, el índice de cosecha y el rendimiento del cultivo de papa.

1.2.4. Se puede predecir el rendimiento de papa en el norte de Sinaloa mediante un modelo de simulación simple en función de la dosis de nitrógeno y la fecha de siembra.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen

Se considera que la papa es originaria de América del Sur, en la zona andina de Perú, Ecuador y Bolivia (Benacchio, 1982; Doorenbos y Kassam, 1979; Horton, 1987). También se menciona que es originaria de las regiones montañosas de Chile. Vavilov (1951) considera que la papa tuvo dos centros de origen: el centro de origen Chiloé para *Solanum tuberosum* y el centro de origen Ecuador, Perú y Bolivia, donde está representada la papa cultivada andina (*Solanum andigenum*). La mayor cantidad de especies diferentes se dan en México, Perú, Bolivia y Argentina y la gran mayoría tienen tubérculos pequeños, amargos, situados al final del estolón (Bonavia, 1993).

2.2. Importancia

La papa es una hortaliza que ocupa el segundo lugar en producción después de los cereales (trigo, arroz y maíz), en 2007 alcanzó una producción de 325 millones de toneladas (FAOSTAT, 2008) y el segundo lugar, después de la soya (*Glycine max* L. Merrill), por su rendimiento de proteína y energía (Horton y Sawyer, 1985). La riqueza nutrimental del tubérculo, el rendimiento alto y el valor económico por unidad de superficie cultivada satisface los requerimientos energéticos y nutricionales de más de dos mil millones de habitantes (Scott *et al.*, 2000), en el 2007 la superficie establecida en mundo fue de 19.3 millones de hectáreas y un rendimiento promedio de 16.8 toneladas por hectárea (FAOSTAT, 2008). Con excepción del maíz, la papa es la especie vegetal que se cultiva en más países (Horton y Sawyer 1985).

La producción mundial de papa en los últimos diez años registró un incremento de 7 %, al pasar de 303 millones de toneladas en 1997 a 325 millones en 2001. Casi 30 % de la producción mundial de papa se concentra en China e India (FAOSTAT, 2008).

En México la papa se ubica dentro de las tres hortalizas de mayor producción junto con tomate y chile. Desde 1998 a 2008 la superficie se ha mantenido alrededor de 63 mil hectáreas con un rendimiento promedio de 18.65 t ha⁻¹, producción que permite satisfacer la demanda interna de consumo en fresco o industrial (SIAP, 2008).

El 57.6 % de la superficie de papa se establece en el ciclo primavera-verano, el resto en otoño-invierno, bajo condiciones de riego se establece el 64.2 % y el resto en temporal. La mayor producción es durante primavera-verano (58.4 %), aunque en otoño-invierno bajo riego se produce el 40 % (SIAP, 2008).

En estos últimos diez años los principales estados productores han sido: Sinaloa, México, Nuevo León, Chihuahua, Sonora y Guanajuato, que en conjunto aportaron 60 % del total de la producción nacional. (SIAP, 2008).

2.3. Factores que afectan el desarrollo del cultivo de la papa

Son muchos los factores que afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo de la papa, pero a su vez están interrelacionados. Wilson *et al.* (1995), Dirks y

Bolton (1981) señalaron que, aunque el crecimiento de un cultivo es afectado por un grupo complejo de factores ambientales y que los de mayor impacto son: la precipitación pluvial, la radiación y la temperatura.

La relación entre los factores con el crecimiento y rendimiento de un cultivo estará en función del clima en que éste se desarrolle (Shaw, 1988), por lo que la fecha de siembra tiene gran importancia en la tuberización y el crecimiento del tubérculo en la planta de papa, en respuesta a la variación en las condiciones de temperatura y humedad del suelo y radiación solar (Soboh *et al.*, 2000), así mismo el número de tubérculos se incrementa con fotoperiodo corto, temperatura baja, radiación solar alta y bajo nivel de fertilización (Slater, 1968).

La baja disponibilidad de nitrógeno provoca una reducción en rendimiento y un exceso de este nutriente provoca efectos negativos sobre la calidad del tubérculo (Huett y Dettmann, 1991). La tuberización puede retrasarse en campo debido a aplicaciones altas de fertilizante nitrogenado (Krauss, 1985).

El genotipo tiene que ver con la respuesta de la planta al ambiente, de acuerdo a la edad fisiológica de la semilla y la etapa de desarrollo de la planta (Jackson, 1999). Además, la duración del ciclo del cultivo de papa depende del genotipo y de la temperatura ambiental y por lo tanto define el tiempo de intercepción de radiación.

2.3.1. Temperatura

La temperatura junto con la radiación solar afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo de papa; también contribuyen a la inducción de la tuberización e influyen en la acumulación de carbohidratos y materia seca de los tubérculos (Soboh *et al.*, 2000), Jackson (1999) menciona que bajas temperaturas promueven la formación de tubérculos mientras que altas temperaturas retardan el inicio de tuberización. Además, las temperaturas mayores a 25 °C reducen la translocación de carbohidratos (Gawronska *et al.*, 1988) y por arriba de 35 °C, la elongación del tallo se detiene (Santibáñez, 1994).

Además, interviene en el proceso de respiración y en la acumulación de almidón en los tubérculos. Las temperaturas altas del suelo hacen que los tubérculos sean de tamaño y formas no deseadas (Rousselle *et al.*, 1996), también altas temperaturas promueven la transpiración y la respiración nocturna, lo cual retrasa la formación del tubérculo (Wolf *et al.*, 1990).

De acuerdo con Rousselle *et al.* (1996), se requieren temperaturas entre 24 a 28 °C para el crecimiento vegetativo, la temperatura óptima para la emergencia de brotes y crecimiento de estolones es 20 °C; mientras que para la formación y desarrollo de tubérculos el rango de temperatura óptimo es 18 a 22 °C (Manrique, 1993).

La temperatura base del cultivo de la papa es de 6 °C (Cao y Tibbitts, 1995). De acuerdo con Santibáñez (1994), la papa requiere una temperatura

media diaria de 21-33 °C. La temperatura del suelo óptima para el desarrollo de tubérculos es de 15 a 18 °C (Doorenbos y Kassam, 1979). La temperatura óptima de suelo para la emergencia va de 22 a 25 °C (Midmore citado por Santibáñez, 1994).

La temperatura del suelo máxima para el crecimiento del tubérculo varía entre 25 y 30 °C (Reynolds y Ewing, 1989; Manrique citado por Santibáñez, 1994). A temperaturas mayores a 25 °C, el peso del tubérculo disminuye (Reynolds y Ewing, 1989) por lo que el índice de cosecha se reduce (Marinus y Bodlaender, 1975; Wolf *et al.*, 1990; Kooman *et al.*, 1996). La temperatura óptima para fotosíntesis fluctúa entre 16 y 25°C (Midmore citado por Santibáñez, 1994).

La temperatura medida como unidades calor o grados días (Snyder, 1985) o tiempo térmico (Bollero *et al.*, 1996) ha mostrado relación alta con el rendimiento de los cultivos, debido a que está relacionado fuertemente con la acumulación de biomasa y la duración del área foliar (Debouck e Hidalgo, 1985).

2.3.2. Radiación en la banda fotosintética

La estimación del rendimiento de un cultivo inicia con el cálculo de la radiación en la banda fotosintética incidente sobre el cultivo (Stuttle *et al.*, 1996). De la radiación incidente total, las plantas usan sólo longitudes de onda entre 400 y 700 nm para la fotosíntesis (McCree, 1972), que es aproximadamente 50 % de la radiación solar global (Monteith, 1969).

Ephrath (1994) señala que la producción de materia seca de los cultivos está estrechamente relacionada con la cantidad de radiación solar incidente, pero es importante la capacidad de la cubierta vegetal para interceptar la radiación, la eficiencia en el uso de la radiación y el índice de cosecha, ya que de esto dependen las diferencias en la producción de biomasa por los cultivos (Charles Edwards, 1982).

En el cultivo de la papa el crecimiento es proporcional con la absorción de radiación fotosintéticamente activa en condiciones libres de malezas, plagas, enfermedades, sin limitantes de agua y nutrientes (Spitters 1987; van Delden 2001). Allen y Scott (1980) señalan que existe una relación lineal entre la radiación interceptada y la biomasa acumulada total o de materia seca del tubérculo en el cultivo de papa.

2.3.3. Nitrógeno

El nitrógeno tiene fuerte influencia en el rendimiento y calidad de tubérculo. Según Huett y Dettmann (1991), un aporte bajo de N provoca una reducción en rendimiento y un exceso de N provoca efectos negativos sobre la calidad del tubérculo. También afectan la duración del ciclo del cultivo de papa y en consecuencia el rendimiento de tubérculos. White *et al.* (2007) mencionan que el N al inicio del cultivo es generalmente abastecido por el suelo. Jackson (1999) señala que baja disponibilidad de N promueve la formación de tubérculos.

La máxima producción en papa se logra cuando existe nitrógeno disponible para la planta en etapas de alta demanda (Sanderson y White, 1987; Stark *et al.*, 1993), por lo que se aplica durante el ciclo de producción para evitar pérdidas de rendimiento y calidad de los tubérculos (Liegel y Walsh, 1976). Sinclair y Horie (1989) indican que la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) en teoría debe disminuir a medida que se incrementa la deficiencia de nitrógeno, lo cual ha sido ampliamente comprobada (Gallagher y Biscoe, 1978; García *et al.*, 1988; Fischer, 1993)

Sin embargo la elevada disponibilidad de nitrógeno puede prolongar el crecimiento vegetativo, favoreciendo la acumulación de biomasa aérea, retrasar el inicio de tuberización, reducir el rendimiento (Vos y Biemond, 1992; Salisbury y Ross, 1994; Saluzzo *et al.*, 1999), disminuir el índice de cosecha (Millard y Marshall, 1986; Ojala *et al.*, 1990; Cieslik, 1997), diversos autores han señalado que el contenido de materia seca se reduce al incremento de nitrógeno (Kleinkopf *et al.*, 1981; Jenkins y Nelson, 1992; Jenkins y Mahmood, 2003; Giletto *et al.*, 2007; Goffart *et al.*, 2008), también decrece la calidad nutricional del tubérculo por la acumulación en exceso de nitratos (Gislason *et al.*, 1984; MacKerron *et al.*, 1995).

Por otro lado las deficiencias de nitrógeno provoca reducción del tamaño de los tubérculos, bajo contenido de materia seca y altos niveles de azúcares reductores (Iritani y Weller, 1980; Sowokinos y Preston, 1988).

Por su parte Huett y Dettmann (1991) encontraron en papa una respuesta en producción de materia seca a las aportaciones de N; sin embargo, las dosis

altas provocaron reducción del rendimiento de tubérculos. La respuesta del cultivo de papa no necesariamente ocurre en rendimiento total, como lo indica Waterer (1997), sino en un mayor calibre de tubérculos con dosis altas de N. Badillo *et al.* (2004) señalan que al incrementar la dosis de N, se incrementa el rendimiento de tubérculos de primera clase al igual que el rendimiento total en el cultivar Alpha, lo que coincide con los reportes de varios autores en otros cultivares (Talley, 1983; Lauer, 1986; Porter *et al.*, 1993; Waterer, 1997; Mohammad *et al.*, 1999).

2.4. Fenología

La fenología estudia los fenómenos periódicos o etapas diferenciadas que ocurren en la vida de las plantas, relacionadas con el ambiente en el cual se desarrollan (Hinojosa, 1979). Los estudios fenológicos ayudan a comprender las respuestas de los seres vivos a los factores ambientales y a la variación de estos a lo largo de su vida, así mismo permiten entender el proceso de producción y cuantificar los efectos del manejo agronómico sobre las plantas (Lara, 1993).

Mora (1998) señala que la descripción de la fenología en papa difiere relativamente entre algunas investigaciones, pero en otras ocasiones existe una marcada discrepancia, debido a la diferencia en objetivos para realizar la división del ciclo biológico y sugiere que dado que la planta de papa crece a partir de tubérculo-semilla, la división del ciclo biológico de esta especie más conveniente y objetiva es la propuesta por Rowe (1993), la cual se detalla a continuación:

I. Crecimiento de brotes. Los brotes se desarrollan a partir de los “ojos” o yemas del tubérculo-semilla (tubérculo madre) y emergen a la superficie. El tubérculo-semilla es la fuente única de energía en esta etapa para el crecimiento de los brotes, que les transfiere 80 % de su biomasa seca (Moorby y Milthorpe, 1983).

II. Crecimiento vegetativo. Empieza con la emergencia y termina con el inicio de la formación de tubérculos en los ápices de los estolones. Las hojas y ramas del tallo se desarrollan a partir de las yemas de los nudos de los brotes emergidos, mientras que las raíces y los estolones se desarrollan de los nudos subterráneos. La planta aún obtiene energía del tubérculo-semilla, aunque la fotosíntesis empieza en este periodo.

La primera y segunda etapa de desarrollo dura de 30 a 70 días, respectivamente, dependiendo de la fecha de siembra, edad fisiológica del tubérculo-semilla y de las características propias de las variedades.

III. Inicio de tuberización. Los tubérculos se forman a partir de los ápices de los estolones. La primera indicación de la formación de un tubérculo es el engrosamiento de la porción subapical del estolón, en la región del gancho, donde la mayor parte de los tejidos contienen células meristemáticas. Esta etapa tiene una duración de 10 a 14 días, el fin de la tuberización en la mayoría de los cultivares coincide con el inicio de floración.

Los cultivares tardíos forman nuevos tubérculos durante la cuarta etapa de desarrollo, es decir, durante el crecimiento de los tubérculos previamente formados. Sin embargo, estos nuevos tubérculos generalmente no alcanzan tamaño comercial y con frecuencia son reabsorbidos por la planta madre.

IV. Crecimiento del tubérculo. Este periodo se caracteriza por presentar división celular y expansión de las células del tubérculo formadas durante la iniciación; las células aumentan su volumen de 7 a 18 veces debido al almacenamiento de agua, nutrimentos y carbohidratos. El crecimiento es lineal si ningún factor es limitante. Durante esta etapa los tubérculos son el sitio dominante para la deposición de carbohidratos en forma de sacarosa, producidos por la fotosíntesis y que posteriormente serán transformados en almidón (Scott y Willockson, 1982).

La tasa de crecimiento de los tubérculos en conjunto es exponencial durante las primeras 2 ó 3 semanas. Después el crecimiento es lineal y decrece cuando el índice de área foliar disminuye a uno, cuando se detiene la producción de hojas y las existentes senescen. En esta etapa el nitrógeno, fósforo y potasio de la parte aérea de la planta se redistribuye a los tubérculos, y en este periodo la biomasa seca de los tubérculos es mayor que la del resto de la planta.

V. Maduración. La senescencia de las hojas es más acentuada y la planta toma un color amarillento por la degradación de clorofilas, lo que trae en consecuencia la disminución gradual de la fotosíntesis. El contenido de

materia seca de los tubérculos alcanza su máximo y su epidermis engrosa. El incremento de materia seca se produce principalmente por el traslado de carbohidratos desde las hojas a los tubérculos. Las yemas inician la latencia, la síntesis de almidón disminuye y se detiene cuando las hojas mueren; el peridermo continúa aumentando de espesor, aún después de que las hojas senescen.

2.5. Área foliar específica

El área foliar específica (AFE) es la relación entre el área foliar y peso de las hojas, por lo que el área foliar se puede calcular como el producto de la tasa de aumento de la materia seca de hojas y el área foliar específica (Van Delden *et al.*, 2000). Para muchos cultivos, el AFE tiende a cambiar con la etapa de desarrollo (Penning de Vries *et al.*, 1989). La dinámica del AFE puede ser una expresión del cambio en la relación fuente-demanda de los tejidos en crecimiento (Johnson y Thornley, 1983). El AFE es afectada por la temperatura y es mayor cuando las plantas desarrollan bajo condiciones de altas temperaturas (Midmore y Prange, 1992).

Haverkort (2007) señala que el AFE en papa es de $200 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Van Delden *et al.* (2000) señalan que el AFE en papa, después del 50 % de emergencia, aumenta linealmente hasta un máximo de 200 a $250 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ en los cultivares Bintje y Eersteling respectivamente, posteriormente decrece ligeramente. Mora (1998) menciona que el AFE es sensible a los cambios ambientales y más propensa a los cambios ontogenéticos, de manera que el autosombreo provoca incremento en su valor. Wroniak *et al.* (2006) estimaron

el AFE durante los años 2000 al 2002 en los cultivares de papa Bekas y Maryna cultivados en macetas con cuatro, cinco y seis gramos de nitrógeno por planta; los autores mencionan que no encontraron diferencias entre la dosis utilizadas, ni entre los cultivares. Vos (1995) reporta que el AFE de papa no fue afectado cuando el nitrógeno incrementó de 5 a 25 g de N m⁻².

2.6. Índice de área foliar

La producción de área foliar es esencial para los procesos de transferencia de energía y masa en la planta, y además es la superficie de intercepción de la radiación solar y por consiguiente tiene efecto en el crecimiento (Boote *et al.*, 1988), transpiración (Enoch y Hurd, 1979) y tasa de crecimiento (Leith *et al.*, 1986). El índice de área foliar permite en los modelos de simulación de papa explicar la intercepción de radiación y mediante la eficiencia del uso de la radiación obtener la acumulación de materia seca.

Según Watson (1947) y Hunt (1978), el área foliar por planta es una medida inapropiada para estimar el follaje de todo un cultivo, ya que no considera el espaciamiento entre plantas, por lo cual se introdujo el concepto de "índice de área foliar (IAF)", definido como el área foliar por unidad de área de suelo. Esta variable es un indicador de la superficie disponible para la absorción de radiación solar y permite calcular el potencial fotosintético de un cultivo (Mitchell, 1970; Hunt, 1978; Reta, 1986).

El IAF óptimo está asociado directamente con el rendimiento máximo de un cultivo (Shibles y Weber, 1965; Williams *et al.*, 1965). Se considera como

IAF óptimo o crítico cuando se intercepta el 95 % de RFA, ya que con valores menores o mayores el rendimiento podría disminuir (Karlen y Camp, 1985; Hashemi-Dezfouli y Herbert, 1992; Andrade *et al.*, 1992), debido a que con un IAF por abajo del óptimo intercepta una reducida fracción de RFA y con un IAF por encima del óptimo, se incrementa el índice de área foliar no iluminado, lo que afecta la relación fotosíntesis: respiración (Andrade *et al.*, 1993; Wells, 1991).

En papa el valor del IAF varía de 1.5 a 9.0 (Watson, 1947; Allen y Scott, 1980; Jefferies y Mackerron, 1993); dicha variación es atribuible a diversos factores tales como, densidad de población, distribución espacial de las hojas, fertilización nitrogenada, humedad en el suelo, genotipo, localidad de producción y presencia de plagas y enfermedades, la tasa de senescencia foliar (Brandes *et al.*, 1973; Hunt, 1978; Allen y Scott, 1980; Jefferies y Mackerron, 1993). Según Genova (1983), para lograr el máximo rendimiento de tubérculo total y comercial se requiere un IAF de 2.7, en cambio McCollum (1978) indica que valores de 3.0 a 3.5 son suficientes para alcanzar tasas máximas de producción de biomasa.

En el cultivo de la papa, el número, tamaño, edad, distribución y orientación de las hojas individuales, afecta la relación entre IAF y radiación total interceptada y en consecuencia la producción de tubérculos, debido a que el crecimiento de éstos depende del adecuado abastecimiento de fotoasimilados procedentes de las hojas (Collins, 1977). Diversos autores (Dyson y Watson, 1971; Sale, 1973) reportan valores máximos de IAF en papa

de 2.5 a 5.5. También señalan que cuando son mayores a 3.5, están generalmente asociado a altas densidades ($>40,000$ plantas ha^{-1}) de población o con variedades tardías.

Mora (1998) encontró que la variedad Alpha de ciclo precoz presentó un IAF menor a 3.0 mientras Norteña y C-771A11 de ciclo intermedio alcanzaron IAF de 4.0 a 4.4. En cambio la variedad Puebla de ciclo tardío tuvo un IAF cerca de 5.0. Raymond *et al.* (2004) reportaron un IAF 4.42 en el cultivar precoz Eersteling y 4.57 en el cultivar tardío Bintje. Al respecto Jefferies y Mackerron (1993) señalan que el IAF aumenta desde las variedades de ciclo precoz con IAF bajos hasta las de ciclo tardío con área foliar alta.

También, el IAF se incrementa con la disponibilidad de nitrógeno. Raymond *et al.* (2004) encontraron que el IAF paso de 2.37 con 0 N, hasta 5.86 con 300 kg N ha^{-1} en el cultivar Eersteling y de 2.45 a 5.31 en la variedad Bintje para los mismos niveles de N.

La estimación del área foliar e IAF es esencial en el análisis de crecimiento y en los modelos de simulación en papa, ya que permite describir la intercepción de radiación y la acumulación de biomasa (MacKerron y Waister, 1985; Firman y Allen, 1989; Jefferies y Heilbronn, 1991). Sin embargo, su uso está limitado por el tiempo que se requiere para calcularlos; su medición es laboriosa y los equipos para calcularla con rapidez y precisión son caros en países en desarrollo (Bhatt y Chanda, 2003). De acuerdo con

Korva y Forbes (1997) es necesario generar métodos más eficientes y fáciles para estimar el área foliar.

Montgomery (1911) sugiere que el área foliar de una planta se puede obtener mediante una relación lineal entre el largo, ancho de la hoja y un factor de ajuste. A partir de este método se han propuesto modificaciones como transformaciones logarítmicas (Lal *et al.*, 1951), ecuaciones de regresión (Elings, 2000; Boedhram *et al.*, 2001; McKee, 1964) y ecuaciones discontinuas (Carberry *et al.*, 1989). En la actualidad el área foliar se puede calcular con equipos como los ceptómetros lineales de fácil uso y alta precisión. Se ha encontrado alta correlación entre el IAF calculado con estos equipos y las determinaciones destructivas del IAF (Wilhelm *et al.*, 2000; Cintra de Jesús *et al.*, 2001; Padilla *et al.*, 2005; Tewolde *et al.*, 2005).

2.7. Coeficiente de extinción

El coeficiente de extinción o atenuación (k) depende de la arquitectura de la planta y se utiliza para estimar la interceptación de radiación por unidad de índice área foliar (Kiniry *et al.*, 1999). Los valores altos de k corresponden a doseles con hojas horizontales, con alto contenido de clorofila, como en el caso de la papa, el girasol y la soya (Nobel *et al.*, 1993), mientras especies como el gladiolo o cultivares de maíz con hojas verticales tienen k bajos. En cultivos hortícolas se presentan valores promedio de k en un rango de 0.5 a 0.8 (Carranza *et al.*, 2008).

Se asume que el coeficiente de extinción usualmente depende del tipo de planta y que presenta baja variación durante el ciclo del cultivo (Weir *et al.*,

1984; Graf *et al.*, 1990; Steer *et al.*, 1993). Sin embargo, en papa Gordon *et al.*, (1997) señalan que el k no debe ser usado como una constante, ya que varía en función del desarrollo foliar del cultivo de papa. Estos autores encontraron que k disminuyó cuando el IAF aumento en las variedades Atlantic, Monona y Norchip, lo cual difiere con diversos autores quienes reportan que no existe una asociación clara entre el IAF y k en papa (Khurana y McLaren, 1982; Burstall y Harris, 1983). Kiniry *et al.* (1999) reportan que no fue evidente la relación entre IAF y k en tres especies de pastos en un estudio de tres años.

Raymond *et al.* (2004) reportan el k decrece con el incremento de la fertilización nitrogenada en los cultivares Eersteling y Bintje. En cambio De la Casa *et al.* (2008) encontraron un k poco variable (0.6) por efecto de tres densidades de siembra (3.9, 6.0 y 7.9 plantas m⁻²) de papa cv. Supunta.

Gordon *et al.* (1997) reportaron para papa un k de 0.61, Bursall y Harris (1983) de 0.44, Jefferies y Heilbronn (1991) de 0.60, Khurana y McLaren (1982) de 0.58 con un IAF de 2.0. Firman y Allen (1989) sugieren usar un k de 0.54 mientras que Haverkort (2007) señala que k es 0.4 en papa.

2.8. Fracción de radiación interceptada en la banda fotosintética (FRI)

La radiación interceptada se relaciona linealmente con la producción de materia seca; en papa la distribución de los fotosintatos es a los tubérculos y el resto de órganos de la planta (Haverkort, 2007). Scott y Wilcockson (1978) fueron los primeros en medir la intercepción de radiación y relacionarla con la

biomasa de papa. Desde entonces se han realizado numerosas publicaciones sobre intercepción de radiación y la eficiencia uso de la radiación (EUR).

Son muchos factores abióticos, como el suministro limitado de nitrógeno, disponibilidad de agua reducida o temperaturas bajas o de congelamiento que pueden reducir el aparato fotosintético, y en consecuencia disminuyen la intercepción de la radiación. Del mismo modo, los factores bióticos como los nematodos (Shah *et al.*, 2004) o enfermedades como el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) pueden reducir drásticamente el rendimiento debido a la reducción de la intercepción de la radiación solar en la banda fotosintética (Haverkort y Bicomumpaka, 1986; Van Oijen, 1991).

Por lo tanto una mayor productividad se asocia con una mayor intercepción de radiación solar, lo cual se obtiene con óptimos de distribución de las plantas, prácticas de manejo, fertilización, entre otros (Gardner *et al.*, 1985). En términos de la estructura del aparato fotosintético, la capacidad del dosel para interceptar radiación en la banda fotosintética depende del índice de área foliar, la orientación y distribución de las hojas (Andrade, *et al.*, 1996).

2.9. Índice de Cosecha y contenido materia seca de los tubérculos

La acumulación y distribución de biomasa en los diferentes órganos de la planta determina el rendimiento biológico (RB) o biomasa total y el rendimiento económico (RE) que equivale al peso seco de los órganos de importancia antropocéntrica; de la relación entre estas características surgió el concepto de índice de cosecha (IC), así: $IC = RE / RB$ (Donald y Hamblin, 1976). En el caso

de la papa, el índice de cosecha se ha incrementado de 0.09 en las especies silvestres a un máximo de 0.81 en los cultivares modernos (Inoue y Tanaka, 1978).

Para obtener altos rendimientos en papa, es necesario formar variedades de alta eficiencia en la translocación de fotosintetizados hacia los tubérculos, es decir, de alto IC, así como aumentar otras características determinantes del rendimiento económico, como el número de tallos por planta, tubérculos por tallo y el peso promedio de los tubérculos (Mora, 1998).

Gmelig y Bodlaender (1981) reportan diferencias en el valor del IC en las variedades de papa Mentor (81 %), Alpha (68 %), Irene (65 %) y Pimpinel (58%), por su parte Mora (1998), reporta IC en la variedad Alpha de 82 % y en Norteña de 87 %, Núñez *et al.* (2009) encontraron diferencias en el IC entre las variedades Diacol, Capiro, Esmeralda, Betina y Pastusa Suprema con 85 %, 83 %, 82 % y 72 % respectivamente.

El contenido de materia seca de los tubérculos (MST) suele determinarse de manera indirecta mediante el peso específico o densidad del tubérculo; un alto contenido de MST favorece la industrialización de papa (Pritchard y Scanlon, 1997; Giletto *et al.*, 2003). La MST es afectada por varios factores, como fecha de plantación, humedad del suelo, época de cosecha y edad fisiológica de los tubérculos, entre otros, por lo que varía a través del tiempo (Pritchard y Scanlon, 1997; Andreu y Silva 2007).

Andreu y Silva (2007) reportan materia seca de los tubérculos entre 16 y 22 % en 20 genotipos de papa, entre ellos la variedad Atlantic con 22 %. Gould (1988) señala valores entre 18.0 y 21 % en cinco variedades comerciales americanas, y Akeley *et al.* (1968) encontraron contenidos de materia seca de 23 % en la variedad Lenape y 18 % en Kathadin y Kennebec en diferentes ambientes y condiciones de cultivo. El general, el contenido de materia seca de los tubérculos varía de 15 % a 24 % (Pavlista, 1997).

Giletto *et al.* (2007) indican que el contenido de materia seca de los tubérculos fue superior a 18 % en cuatro variedades de papa y que el aumento de N disponible disminuyó la MS en los tubérculos. En este sentido, Vos (1997) encontró que la MST del cultivar Prominent disminuyó de 27 % a 22 % cuando aumentó la dosis de nitrógeno de 0 a 36 g m⁻². Asimismo el índice de cosecha disminuyó cuando aumentó la dosis de fertilización nitrogenada (Bélanger *et al.*, 2000; Ojala *et al.*, 1990; Cieslik, 1997; Millard y Marshall, 1986).

2.10. Eficiencia en el uso de la radiación

Monteith (1977) define la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) como la tasa de materia seca producida por unidad de energía radiante absorbida por el cultivo. Se refiere a la pendiente de la regresión lineal entre la acumulación de biomasa y la energía solar absorbida por el cultivo (Monteith, 1977; Ruimy *et al.*, 1995).

Para estimar la EUR a largo plazo se utiliza la biomasa, pero en un corto tiempo (un día o menos) es difícil medir los cambios en aumento de biomasa,

en el caso anterior la EUR se estudia mediante el intercambio gaseoso de CO₂, aunque los resultados son difíciles de comparar con los de la biomasa o de largo plazo. Se han realizado pocos estudios para estudiar la EUR desde el intercambio de CO₂ pero se ha encontrado una relación lineal entre la asimilación neta diaria por un dosel cerrado y la acumulación de RFA interceptada en un día, para lo anterior se requiere una EUR constante diaria (Sinclair, 1991; Ruimy *et al.*, 1995; Sinclair y Muchow, 1999). Sin embargo, la fotosíntesis instantánea del dosel tiende a saturarse con alta irradiancia por lo que la EUR varía durante el transcurso del día (Grace *et al* 1995; Ruimy *et al.*, 1995).

La EUR varía entre cultivos y entre genotipos y por lo tanto existen diferencias en rendimiento (Sivakumar y Virmani, 1984; Gosse *et al.*, 1986; Prince, 1991). La EUR en papa es afectada por las prácticas de manejo como la fertilización nitrogenada (Muchow y Davis, 1988; Sinclair y Horie, 1989; Hammer y Wright, 1994; Gallagher y Biscoe, 1978), condiciones de sequía u otros factores abióticos o bióticos que disminuyen la tasa fotosintética (Sinclair y Horie, 1989; Jamieson *et al.*, 1995), por lo que tiene un rango amplio de variación de 1.5 a 4.0 g MJ⁻¹.

También, la variación en la EUR de papa se debe a la metodología empleada para medir la radiación y la intercepción solar (Sinclair y Muchow, 1999). Algunos autores sugieren que la conversión de EUR basada en la radiación solar total se logra multiplicando ésta por la fracción de RFA

(normalmente 0.5, Sinclair y Muchow, 1999), lo cual ha sido señalado como inapropiado, ya que depende además del IAF (Bonhomme, 2000).

La radiación interceptada es diferente a la absorbida por un cultivo y por consiguiente causa variación en el cálculo de la EUR (Sinclair y Muchow, 1999). En ese sentido Bonhomme (2000) sugiere que el 85% de la RFA interceptada (RFAI) es absorbida por la cubierta vegetal pero esto es exacta cuando el IAF es grande, y dicho valor decrece cuando la cubierta es menos densa. La variación en la estimación de la EUR puede reducirse si se muestrea la radiación interceptada y la absorbida continuamente durante un periodo dado.

Sinclair y Muchow (1999) sugirieron que la relación entre la acumulación de biomasa y la acumulación de radiación interceptada proporciona una estimación apropiada de la EUR y señalan que la exactitud del muestreo de la biomasa de un cultivo contribuirá a minimizar la variación en la estimación de la EUR. Mientras este método es el más utilizado para estimar EUR, también es criticado debido al uso de datos acumulativos por su debilidad lógica y aritmética (Demetriades Shah *et al.*, 1992, 1994).

Shah *et al.* (2004) reportaron que la EUR incrementó de 1.8 a 2.8 g MJ⁻¹ al aumentar la dosis de nitrógeno de 0 a 250 kg ha⁻¹. van Delden (2001) no encontraron diferencias en la EUR entre los cultivares Junior (entre 2.13 y 2.28

g MJ⁻¹) y Agria (entre 2.17 y 2.32 g MJ⁻¹) en 1997 y 1998, mientras que Kooman (1995) señala que la EUR de papa es 1.18 g MJ⁻¹.

Haverkort *et al.* (1992) evaluaron la EUR en los cultivares de papa Darwina, Désirée, Mentor y Elles y señalan que las variedades precoces presentan mayor EUR que los cultivares tardíos. La EUR en papa es de 3.5 g MJ⁻¹ durante el desarrollo vegetativo y la formación de tubérculos (Sale, 1973; Manrique *et al.*, 1991). Manrique *et al.* (1991) cuando calcularon la EUR en papa cultivar Hawai a diferentes altitudes, varió de 2.2 g MJ⁻¹ a 91 msnm a 2.8 g MJ⁻¹ a 1097 msnm. Sinclair y Muchow (1999) reportan una EUR de 3.3 g MJ⁻¹, pero en sus resultados obtuvieron de 1.6 a 1.7 g MJ⁻¹. En dos estudios independientes en Inglaterra, RUE varió de 3.5 a 3.7 g MJ⁻¹ (Allen y Scott, 1980) y 2.5 a 3.4 g MJ⁻¹ (Khurana y McLaren, 1982). En Escocia Jefferies y MacKerron (1989) reportan una EUR de 3.9 g MJ⁻¹. En un estudio realizado en Japón durante cinco años (1982-1986) y cuatro cultivares de papa, la EUR fue 2.94 g MJ⁻¹ para el cultivar Benimaru (1982) y 4.19 g MJ⁻¹ para el cultivar Toyoshiro (1983) (Nishibe *et al.*, 1989).

2.11. Modelación

Los modelos de simulación de cultivos constituyen una herramienta fundamental para un manejo agronómico sustentable. Uno de los grandes problemas que enfrenta la agronomía es la extrapolación de resultados de experimentos agronómicos puntuales a otras condiciones, variedades cultivadas o períodos de tiempo (Bowen *et al.*, 1999; Gijssman y Bowen, 2001). De ahí el gran valor que pueden tener los modelos de simulación para

optimizar las prácticas agronómicas en cada condición ecológica (Vos, 1995). Además, permiten evaluar la solidez de los conocimientos disponibles y definir las prioridades de investigación (Penning de Vries y Rabbinge, 1995, Bowen *et al.*, 1998).

Los modelos mecanicistas son apropiados para expresar y probar hipótesis matemáticamente, proporcionar una descripción cuantitativa, explicar los procesos más relevantes que ocurren en un sistema de cultivo (Thornley y Johnson, 2000), tomar decisiones sobre el manejo de los sistemas agrícolas y auxiliar en la enseñanza (Van Ittersum *et al.*, 2003; Bouman *et al.*, 1996). En diversos países se han desarrollado modelos para cultivos a nivel de campo con objetivos tanto científicos como prácticos. Como resultado se han generado modelos o familias de modelos para diversos cultivos entre los cuales están CERES (Ritchie y Otter, 1985; Jones y Kiniry, 1986), EPIC (Williams *et al.*, 1989); SUCROS (Van Keulen *et al.*, 1982; Spitters *et al.*, 1989).

Uno de los modelos teóricos más conocido es SUCROS (a Simple and Universal CROp growth Simulator), el cual es un modelo de crecimiento y desarrollo potencial para cultivos en campo abierto desarrollado durante los últimos 20 años (van Keulen *et al.*, 1982; Spitters, *et al.*, 1989, Goudriaan y van Laar, 1994, van Laar *et al.*, 1997).

El modelo SUBSTOR forma parte de la familia de modelos DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, Tsuji *et al.*, 1994). Este modelo simula el desarrollo del cultivo de papa utilizando información diaria de

temperatura, precipitación y radiación solar, información sobre el perfil del suelo y detalles de las prácticas agronómicas (Hodges *et al.*, 1989; Ritchie *et al.*, 1995).

El modelo Simpotato es parte de la familia de modelos CERES (Godwin y Singh, 1989; IBSNAT, 1990; IBSNAT, 1991; Ritchie *et al.*, 1989; y Ritchie *et al.*, 1991). Es un modelo de simulación del crecimiento del cultivo de papa, el cual tiene un rango amplio de aplicaciones; a nivel de campo permite programar el riego y la fertilización, predecir el rendimiento en respuesta a diferentes regimenes de humedad, etc.; a nivel regional sirve para estimar el potencial de rendimiento con base a clima y tipo de suelo y a nivel de investigación como una herramienta para probar hipótesis de cómo los factores ambientales (luz, temperatura, humedad y nitrógeno) interactúan con los procesos fisiológicos para determinar desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo.

SWACROP es un modelo que describe la absorción de agua por las raíces, y determina la transpiración y el rendimiento del cultivo (Feddes y Koopmans, 1995). Otros modelo es el WOFOST desarrollado en Holanda (1988), el cual calcula la producción potencial y limitación por agua y nutrientes (Supit *et al.*, 1994) al igual que el CROPWATN desarrollado en Finlandia en 1988 (Karvonen y Kleemola, 1995) y el MSPEC-PAPA, en México, 1998, que simula la producción potencial para diferentes condiciones ambientales y evaluación de daños. Este modelo incluye el balance de agua en el suelo y se trabaja ya en la inclusión del balance de nitrógeno, así como el efecto de organismos dañinos (Rocha *et al.*, 2000).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Sitio experimental

La investigación se realizó en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, a 25°45'45" latitud Norte, 108°48' 45" longitud Oeste y a 14.6 msnm, durante el ciclo otoño - invierno 2007/2008.

El clima dominante es el BW (h')w(e'), un clima muy seco, con temperatura media anual del mes más frío sobre los 18 °C y media anual sobre 22 °C, con lluvias en verano y temperatura muy extrema mayor de 41 °C (García, 1988).

El experimento se estableció en un suelo arcilloso arenoso, profundo, sin problemas de salinidad y pH alrededor de 7.0, óptimo para el cultivo de papa.

3.2. Datos meteorológicos

Se obtuvieron registros diarios de la temperatura máxima y mínima del aire (°C), humedad relativa (%), radiación fotosintéticamente activa ($W m^{-2}$) y precipitación (mm) de la estación automatizada meteorológica "Batequis" del Campo Experimental Valle del Fuerte, a 30 m de distancia de la parcela experimental.

3.3. Genotipos

Se utilizaron las variedades comerciales de papa cv. Alpha, Atlantic y FL-1867 (Cuadro 1), las cuales se seleccionaron por su importancia económica actual. El material de propagación fue semilla-tubérculo con brotes desarrollados y sanos.

Cuadro 1. Características del material genético utilizado.

Variedad	Tipo de planta	Ciclo biológico	Resistencia <i>P. infestans</i>	Rendimiento económico
Alpha	Compacta baja	Tardío	Susceptible	Alto
Atlantic	Compacta baja	Intermedio	Susceptible	Mediano
FL-1867	Compacta baja	Precoz	Susceptible	Mediano

El cultivar Alpha se obtuvo mediante cruzamiento (Paul Kruger x Preferent) en Wageningen, Holanda, en 1919. Atlantic fue obtenida de la cruce (B5141-6 (Lenape) x Wauseon) en E.U.A. en 1969 y se utiliza desde 1976. FL-1867 se obtuvo por la cruce (Atlantic x FL 162) en Wisconsin, USA en 1989, es la de más reciente liberación.

3.4 Tratamientos

Los tres genotipos se establecieron en dos fechas de siembra y se aplicaron cuatro dosis de nitrógeno (N), por lo que se generaron 24 tratamientos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Factores y niveles de estudio y tratamientos formados.

TRAT	FECHA DE SIEMBRA	VARIEDAD	DOSIS DE NITROGENO (kg ha ⁻¹)			
			N0	N1	N2	N3
1-4	30/10/2007 (PFS)	Alpha	0	100	200	300
5-8	20/11/2007 (SFS)	Alpha	0	100	200	300
9-12	30/10/2007	Atlantic	0	100	200	300
13-16	20/11/2007	Atlantic	0	100	200	300
17-20	30/10/2007	FL-1867	0	100	200	300
21-24	20/11/2007	FL-1867	0	100	200	300

TRAT= Tratamientos

3.5. Diseño experimental y tamaño de parcela

Se utilizó el diseño experimental bloques al azar con arreglo factorial. Se establecieron tres repeticiones por tratamiento, cada unidad experimental estuvo constituida por seis surcos de seis metros de largo, a una separación de 90 cm entre ellos (32.4 m²). El área experimental ocupó 2,332.8 m².

3.6. Método de siembra y densidad de población

La primera fecha de siembra fue el 30 de octubre de 2007 y la segunda el 20 de noviembre 2007, ambas se establecieron bajo condiciones de campo y riego por gravedad. Antes de la siembra, se tomaron muestras de suelo para conocer las condiciones fisicoquímicas del terreno. Al momento del surcado se aplicó el 60 % del nitrógeno correspondiente por tratamiento (60, 120, 180 kg ha⁻¹) y se aplicó el riego de presiembra. La siembra se realizó a tierra venida;

se depositó un tubérculo-semilla cada 25 cm en el fondo del surco, es decir cuatro tubérculos por metro lineal, con lo que se obtuvo una densidad de 44,444 plantas ha⁻¹.

3.7. Prácticas de manejo

Después de la siembra, se asperjó al tubérculo-semilla con una mezcla de fungicidas junto con un insecticida (Azoxistrobin, Tiabendazol y Thiametoxam 1.5, 3.0 y 0.6 kg ha⁻¹ respectivamente) y finalmente se cubrió mecánicamente la semilla-tubérculo a una profundidad de 20 cm. A los 35 días después de la emergencia se aplicó manualmente el 40% de N restante; es decir, 40, 80 y 120 kg de N ha⁻¹, para los tratamientos de 100, 200 y 300 kg de N ha⁻¹ respectivamente.

Para el combate de malezas en pre-emergencia del cultivo se aplicó herbicida (Glifosato 1 L ha⁻¹), posteriormente se eliminaron mediante un paso de cultivadora y deshierbes manuales. El combate de las plagas fue con insecticidas aplicados contra insectos chupadores, inmediatamente después de la emergencia (Monocrotofos 0.75 L ha⁻¹) y durante el ciclo vegetativo con Lamdacihalotrina y Metamidofos (0.5 y 1.0 L ha⁻¹ respectivamente).

Para prevenir tizón tardío (*Phytophthora infestans*) fue necesario realizar dos aplicaciones de fungicidas (Clorotalonil 1.5 L y Mancoceb 2.0 kg ha⁻¹) durante la primer semana de diciembre, para la primera fecha de siembra. Así mismo, en la segunda semana de enero se aplicaron los mismos productos y dosis en ambas fecha de siembra. En la última semana de enero se aplicó

Curzate (Cimoxanil + Mancozeb 2.5 L ha⁻¹) para el control de tizón tardío únicamente en el experimento de la segunda fecha de siembra.

3.9. Variables evaluadas

3.9.1 Fenológicas

Para cada una de las variedades se identificaron las siguientes etapas fenológicas (Rowe, 1993):

Emergencia (EM). Etapa en la que emergió más de 50 % de plántulas de la unidad experimental.

Inicio de formación de estolones (IFE). Etapa en la que al menos un estolón fue visible en el tallo principal de una muestra de ocho plantas de cada variedad.

Inicio de tuberización (IT). Etapa en la cual al menos 50 % de ocho plantas muestreadas presentaban un estolón con ápice engrosado (3 mm o mayor).

Floración (FLO). Etapa en la cual 50 % de los botones florales de la primera inflorescencia del tallo principal estuvieron en antesis.

Madurez comercial de los tubérculos (MCT). Se consideró que los tubérculos alcanzaron la madurez comercial cuando el follaje se tornó amarillo y las hojas inferiores senescieron.

3.9.2. Crecimiento

3.9.2.1. Grados días de desarrollo (GDD). Se calcularon los grados días de desarrollo requeridos para alcanzar cada una de las etapas fenológicas con el método residual.

$$GDD = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_b \dots\dots\dots (Ecuación 1)$$

Donde: Tmax, es la temperatura máxima. Tmin, temperatura mínima. Tb, temperatura base para el desarrollo de la papa (6°C según Cao y Tibbitts, 1995).

3.9.2.2. Acumulación de Biomasa. Se realizó la disección de tres plantas, separando los órganos de la parte aérea, en la cual se incluyó hojas y tallos, de la parte subterránea (raíces, estolones y tubérculos). Una vez separados, se colocaron en bolsas de papel y se introdujeron a una estufa con circulación de aire forzado a 70 °C durante 72 h, hasta alcanzar peso constante. El peso se determinó con una balanza analítica digital con aproximación de centésimas de gramo. Se determinó la biomasa seca (g) de cada órgano de la planta (hojas, tallo, raíces, estolones, tubérculos), en cada muestreo.

3.9.2.3. Distribución de biomasa. La fracción de biomasa acumulada para formar raíz (FRRAZ), tallo (FRTALL), hojas (FRHOJ) y tubérculos (FRTUB), se calculó dividiendo el peso de cada órgano entre la biomasa total de la planta.

3.9.3. Eficiencia fisiológica

3.9.3.1. Índice de área foliar (IAF). Esta variable se obtuvo mediante muestreos destructivos y no destructivos.

3.9.3.1.1. Método destructivo. En la primera fecha de siembra se realizaron tres muestreos destructivos por tratamiento: al inicio de la formación de estolones (16 DDE), al inicio de la ramificación (30 DDE) y en la madurez fisiológica (60 DDE). En cada muestreo se defoliaron dos plantas, y se calculó el área foliar (cm^2) utilizando un escáner y el software ImageJ versión 1.38x (Rasband, 2007).

3.9.3.1.2. Método no destructivo. Se hicieron siete muestreos sistemáticos (cada nueve días) con tres repeticiones cada uno con un analizador de dosel vegetal (AccUPAR, Ceptometer, Decagon Devices, Pullman, Washington, USA) entre las 10:00 y 13:00. Cada lectura consistió en medir la radiación fotosintéticamente activa (RFA) encima (RFAa) y debajo (RFAd) del dosel colocando la barra del equipo nivelada y transversalmente a los dos surcos centrales en cada unidad experimental.

El analizador de dosel utiliza la siguiente ecuación para estimar el IAF:

$$IAF = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2k} \right)^{fb-1} \ln \left(\frac{RFAd}{RFAa} \right) \right]}{A (1 - 0.47 fb)} \dots\dots\dots (Ecuación 2)$$

Donde: *fb*, es un valor que el equipo AccuPAR obtiene comparando la fracción de la radiación directa con respecto a la radiación solar recibida, depende de la localidad y el ángulo del cenit.

A, es un coeficiente de absorción general del dosel que resulta igual a 0.86 para una absorbancia de 0.9 (Campbell, 1986)

k, es el coeficiente de extinción lumínico, el cual se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\sqrt{x^2 + \tan^2 \Theta}}{x + 1.744(x + 1.182)^{-0.733}} \dots\dots\dots (Ecuación 3)$$

Donde: x, es el parámetro del ángulo de distribución foliar; en papa, x= 2.

Θ, es el ángulo del cenit del sol, cuyo valor depende de la posición geográfica y la estación del año.

3.9.3.2. Coeficiente de extinción (k). Debido a que el ceptometro no muestra el valor de k, se calculó con las mediciones de radiación fotosintética activa por encima (RFAa) y debajo el dosel vegetal (RFAd) y con la ecuación propuesta por Flénet *et al.* (1996).

$$k = \frac{\ln (RFAa) - \ln (RFAd)}{IAF} \dots\dots\dots (Ecuación 4)$$

3.9.3.3. Área foliar específica (AFE). Se determino en cm² por g, con la formula propuesta por Hunt (1982):

$$AFE = \frac{\text{área foliar (cm}^2\text{)}}{\text{peso seco (g)}} \dots\dots\dots(\text{Ecuación 5})$$

3.9.3.4. Fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (FRI). Con las mediciones de radiación fotosintética activa por encima (RFAa) y debajo del dosel vegetal (RFAd) realizadas para la obtención del IAF, se calculo la FRFAI, primero se calculó la luz transmitida (t) por el dosel, ya que la transmitancia (t) media de la radiación a través del dosel con hojas distribuidas de manera aleatoria puede ser representada por analogía con la Ley de Beer (Monsi y Saeki, 1953), de la siguiente forma:

$$t = \exp^{-k \text{ IAF}} = \frac{\text{RFAd}}{\text{RFAa}} \dots\dots\dots(\text{Ecuación 6})$$

Posteriormente a partir de t, se procedió a calcular la FRFAI mediante la ecuación:

$$\text{FRFAI} = 1 - t \dots\dots\dots(\text{Ecuación 7})$$

La reflectancia de la RFA fue ignorada por considerarse relativamente constante y baja (Scott *et al.*, 1968).

3.9.3.5. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética (EUR). La EUR se calculó con base en el modelo de Monteith (1977) para calcular la acumulación de biomasa:

$$\text{BIOMASA ACUMULADA} = \text{EUR} \times \text{FRFAI} \times \text{RFA} \dots\dots\dots(\text{Ecuación 8})$$

$$\text{EUR} = \frac{\text{BIOMASA}}{\text{FRFAI} \times \text{RFA}} \dots\dots\dots(\text{Ecuación 9})$$

3.9.3.6. Índice de cosecha (IC). El índice de cosecha se calculó con base en la propuesta de Donald y Hamblin (1976).

$$IC = \left(\frac{BTUB}{BTOT} \right) \times 100 \dots\dots\dots(Ecuación 9)$$

Donde: BTUB, es la biomasa de tubérculos por planta. BTOT, es la biomasa total por planta.

3.9.3.7. Contenido de materia seca de los tubérculos (MST). Para obtener el contenido en porcentaje de materia seca de los tubérculos, se utilizó el peso seco de 100 g de tubérculo fresco y se puso a secar hasta peso constante (método gravimétrico).

3.9.4. Rendimiento (REN)

Se cosecharon las plantas de una muestra de 3.6 m² de cada unidad experimental. Se contabilizó el número de tubérculos por m² (NTT) y se clasificaron por diámetro y biomasa fresca de acuerdo con la Norma Mexicana de Calidad de la Papa (Cuadro 3), lo cual incluyó contar los tubérculos no comerciales (NTNC) que son los tubérculos pequeños, deformes, rajados y manchados. Para cada categoría antes mencionada, se obtuvo el rendimiento, en peso fresco de tubérculos (t ha⁻¹).

Cuadro 3. Código de tamaño de tubérculo de acuerdo a la Norma Mexicana de Calidad de la Papa NMX-FF-022-SCFI-2002.

Tamaño	Diámetro en milímetros (mm)	Peso en gramos (g)
Gigante	Mayor de 76	Mayor de 371

1	66-75	231-360
2	56-65	141-230
3	51-55	71-140
4	44-50	40-70
5 (Rezaga)	Menor de 44	Menor de 30

3.9.6. Análisis estadístico

Se hizo un análisis de varianza para las variables en estudio, prueba de medias de Tukey y correlaciones con el software SAS Versión 8 (SAS Institute Inc., 1999-2000).

3.9.6. Componentes del modelo

Variables meteorológicas. Los datos registrados diariamente de temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin) y de Radiación fotosintéticamente activa (RFA MJ m⁻² d⁻¹), Humedad relativa (HR %), Velocidad del Viento (VV m s⁻¹), Precipitación (PP mm), se guardaron en un archivo de texto para que el modelo tuviera acceso a ellos a través de una estructura especializada para el acceso de datos externos con la etiqueta "CLIMA".

Grados día de desarrollo (GDD). A partir de los datos de temperatura máxima y mínima se calculó la temperatura media (TMED) y mediante el método residual se calcularon los GDD en un compartimento del diagrama del modelo.

Edad fisiológica (EDFIS). Con la fenología del cultivo se calculó la edad fisiológica, se consideró de cero para antes de emergencia, de uno para inicio de floración y dos para madurez fisiológica. Para obtener la EDFIS como una variable numérica, se utilizaron los GDD para floración (IFLO) y madurez fisiológica (MFIS) con las siguientes condiciones: si $UCAC < IFLO$ entonces $UCAC/IFLO$, si $UCAC = IFLO$ entonces $IFLO/IFLO$ y si $UCAC > IFLO$ entonces $1 + ((UCAC - IFLO) / (MFIS - IFLO))$.

Eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Se calculó como la tasa de cambio en la producción de materia seca ($g\ m^{-2}$) en función de RFA acumulada ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), y se introdujo en el diagrama del modelo como constante para cada una de las variedades y dosis de nitrógeno.

Índice de área foliar (IAF). El IAF se consideró como variable y se calculó con base a las variables de PSHOJ y el AFE, de la siguiente manera:
 $IAF = PSHOJ \times AFE$

Fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (FRFAI). La FRFAI se introdujo al diagrama del modelo como variable. Se calculó con la ecuación: $1 - \exp(-kL \cdot IAF)$, donde $kL = 0.59$ es el coeficiente de extinción calculado experimentalmente (Ecuación 4).

Tasa de crecimiento de la materia seca (TC). Con las variables EUR, RFA e IAF se estimó la tasa de crecimiento ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$) (Ecuación 8).

Biomasa de raíz, tallo, hojas y tubérculos. La biomasa de la raíz (PSRZ), del tallo (PSTLL), de las hojas (PSHJ) y del tubérculo (PSTB), se calculó con la TC multiplicada por la fracción de biomasa correspondiente al órgano en cuestión, por ejemplo para raíz se obtuvo la siguiente ecuación:
$$PSRZ=TC*FRRAZ$$

Biomasa Acumulada (BIOMASA). Esta variable se introdujo al modelo como la suma de la biomasa de cada uno de los órganos, mediante la siguiente ecuación: $BIOMASA= PSRZ+ PSTLL+ PSHJ+ PSTB$

Contenido de materia seca de los tubérculos (MST). Se introdujo al modelo como constante para cada una de las variedades.

Rendimiento (REN). El rendimiento se calculó con el PSTB ($g\ m^{-2}$) y el contenido de materia seca del tubérculo, se multiplicó el PSTB por el MST para convertir el rendimiento a $t\ ha^{-1}$.

Demanda de nitrógeno (DemandaN). Para determinar la demanda de nitrógeno del cultivo, se utilizó la variable BIOMASA multiplicada por la dosis de nitrógeno necesaria para producir dicha biomasa de acuerdo a Mendoza (1998).

Submodelo Demanda de Agua del Cultivo (DAC). La demanda de agua es calculada por la evapotranspiración del cultivo (ETc) de acuerdo a la metodología FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), que considera diversos

factores climáticos como radiación solar neta de onda corta (RNS), larga (RNL), humedad relativa (HR), temperatura media (TMED), saturación de presión de vapor (SATVAP), duración de la luz del día (HRLUZ) y velocidad de viento (VV); factores de suelo como textura, densidad aparente (DA), capacidad de campo (CC), punto de marchites permanente (PMP), la disponibilidad de agua (HUMAP). Factores de cultivo como el coeficiente del cultivo (Kc), edad fisiológica del cultivo (EDFIS) y profundidad de la raíz (PrRz). También considera la latitud y el tiempo en día juliano (DJ).

Submodelo Dosis de Fertilización Nitrogenada (DFN). Este submodelo contempla el nitrógeno inorgánico en el perfil del suelo (Ni) y el mineralizado (Nm) proveniente de la materia orgánica del suelo. Para el cálculo se consideran los resultados de análisis de suelo de NNO_3 , la densidad aparente del suelo, la relación C/N, las pérdidas por lixiviación y eficiencia del nitrógeno por efecto del sistema de riego (EN), de tal manera que la dosis de nitrógeno por aplicar (DN) se obtiene con la siguiente ecuación: $(\text{DemandaN}/\text{EUN}) - \text{Nm} + \text{Ni}$.

3.9.7. Creación del Modelo

El modelo se creó con el programa ModelMaker versión 4 (1993-2000), software especializado para crear modelos matemáticos. En este programa es fácil crear estructuras que permiten acceder a bases de datos externos, parámetros, variables y compartimentos que integran ecuaciones diferenciales. Además, se pueden crear vínculos entre estructuras para definir claramente el flujo del modelo. También cuenta con opciones para optimizar parámetros del modelo y graficar resultados.

Las variables externas fueron: Temperatura máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$), y la radiación fotosintéticamente activa diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), humedad relativa (%), velocidad del viento (m s^{-1}) y precipitación (mm).

La tasa de crecimiento diaria (TC) en papa se determinó en función de la fecha de siembra (efecto de la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y la irradiancia fotosintética MJ m^{-2}), índice de área foliar disponible para capturar la radiación fotosintética, y la eficiencia en el uso de la radiación, afectada a su vez por la variedad y la dosis de nitrógeno. La humedad edáfica y otras variables de manejo no fueron limitantes.

El índice de área foliar fue la variable dentro del modelo que afectó la tasa de crecimiento, la interceptación de la radiación en la banda fotosintética, la tasa de crecimiento, la biomasa total y el rendimiento de tubérculo.

Los parámetros del cultivo fueron: Coeficiente de extinción (kL), el área foliar específica ($\text{AFE m}^2 \text{g}^{-1}$), temperatura base (TB). Los parámetros del submodelo de demanda de agua

Las fracciones de fotosintatos para formar raíz (FRRZ), tallo (FRTA), y hojas (FRHJ) y tubérculos (FRTUB) se introdujeron como variables ya que están determinadas por la edad fisiológica del cultivo.

La evaluación del modelo se realizó mediante el porcentaje de error entre los datos simulados y observados, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$MPE = \frac{\sum_{i=1}^n [(RENobs - RENsim) / RENobs] * 100}{n}$$

Donde: RENobs, es el rendimiento observado. RENsim, es el rendimiento simulado.

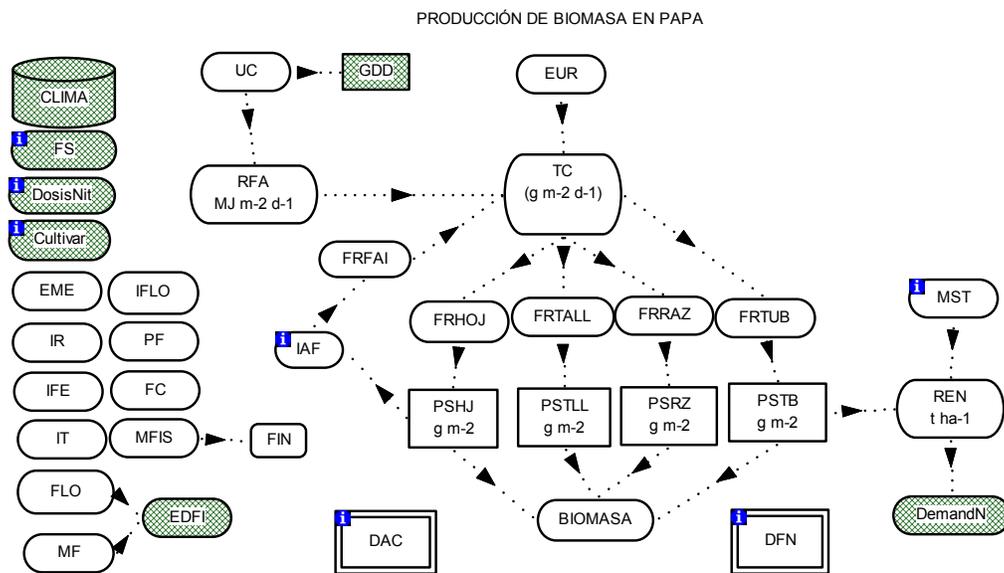


Figura 1. Diagrama de modelo de crecimiento de papa en función de la fecha de siembra, dosis de nitrógeno, los grados día de desarrollo y la radiación solar.

Los cilindros indican unidades de acceso a bases de datos externas, las cápsulas son para definir funciones, los rectángulos son estructuras para integrar ecuaciones, los rectángulos con doble borde son submodelos, las

líneas con flechas representan el flujo o la influencia entre variables, y el rectángulo con ángulos redondeados permite establecer criterios para que el modelo termine de correr.

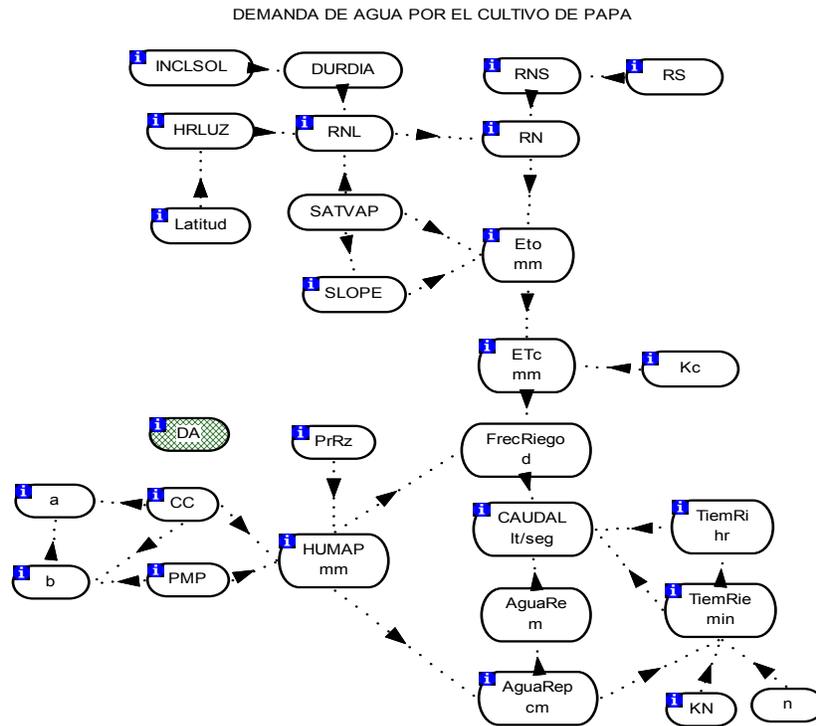


Figura 2. Diagrama del submodelo de la demanda de agua en papa.

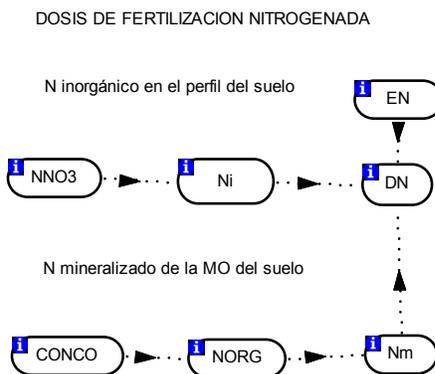


Figura 3. Diagrama del submodelo de la demanda de nitrógeno en papa.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Condiciones ambientales

Las condiciones meteorológicas predominantes durante el experimento del 30 de octubre 2007 al 10 de marzo 2008, se muestran en la Figura 4. La temperatura media diaria registrada durante la primera fecha de siembra (PFS, 30 de octubre 2007) fue de 12 a 23 °C con 17 °C en promedio; mientras que para la segunda fecha de siembra (SFS, 20 de noviembre 2007) fue de 12 a 20 °C y con 16.5 °C en promedio (Figura 4A), por lo que la temperatura del aire podría considerarse similar en ambas fechas de siembra.

Las temperaturas promedio por fecha de cultivo fueron 3 y 3.5 °C inferiores a la óptima (20 °C) para la emergencia de brotes y crecimiento de estolones (Rousselle *et al.*, 1996); también fueron inferiores al rango de temperatura óptimo (18 a 22 °C) para la formación y desarrollo de tubérculos (Manrique, 1993), y crecimiento vegetativo (24 a 28 °C) (Rousselle *et al.*, 1996), aunque fueron frecuentes los registros de temperatura máxima sobre 25 °C, inclusive hasta 35 °C, lo que indica la presencia de periodos durante el día con temperaturas óptimas o mayores para el crecimiento vegetativo y del tubérculo.

En la PFS se registraron 13 días con temperaturas bajas (entre 2 y 5 °C) en la etapa de fruto canica (1-3 cm de diámetro) y madurez fisiológica, es decir en la etapa reproductiva, mientras que en la SFS se contabilizaron 19 días con temperaturas bajas, prácticamente durante todo el ciclo de cultivo, desde la

etapa de formación de estolones, inicio de floración y hasta la etapa de fruto tamaño canica.

La humedad relativa máxima fue 70 a 97 % con un promedio de 93 % (Figura 1B). Santibáñez (1994) señala que la humedad ambiental alta favorece el crecimiento del tubérculo de papa. De acuerdo con un estudio realizado por Wheeler *et al.* (1989) en tres cultivares de papa y dos niveles de humedad relativa (50 y 85 %), la humedad relativa no tiene un efecto significativo en la producción de biomasa por planta. En cambio, el efecto más importante sería en el daño producido a las estructuras vegetales por efecto de la incidencia de hongos y bacterias, bajo condiciones altas de humedad ambiental.

En cuanto a la radiación fotosintéticamente activa, el valor mínimo y máximo durante el ciclo del cultivo fueron 6.0 y 13.8 MJ m⁻² d⁻¹, con un promedio de 10.1 MJ m⁻² d⁻¹ (Figura 4C). La precipitación fue escasa, aunque se presentaron lloviznas en las dos primeras semanas de diciembre (Figura 4D) lo que permitió incrementar los intervalos de riego en ambas fechas de siembra.

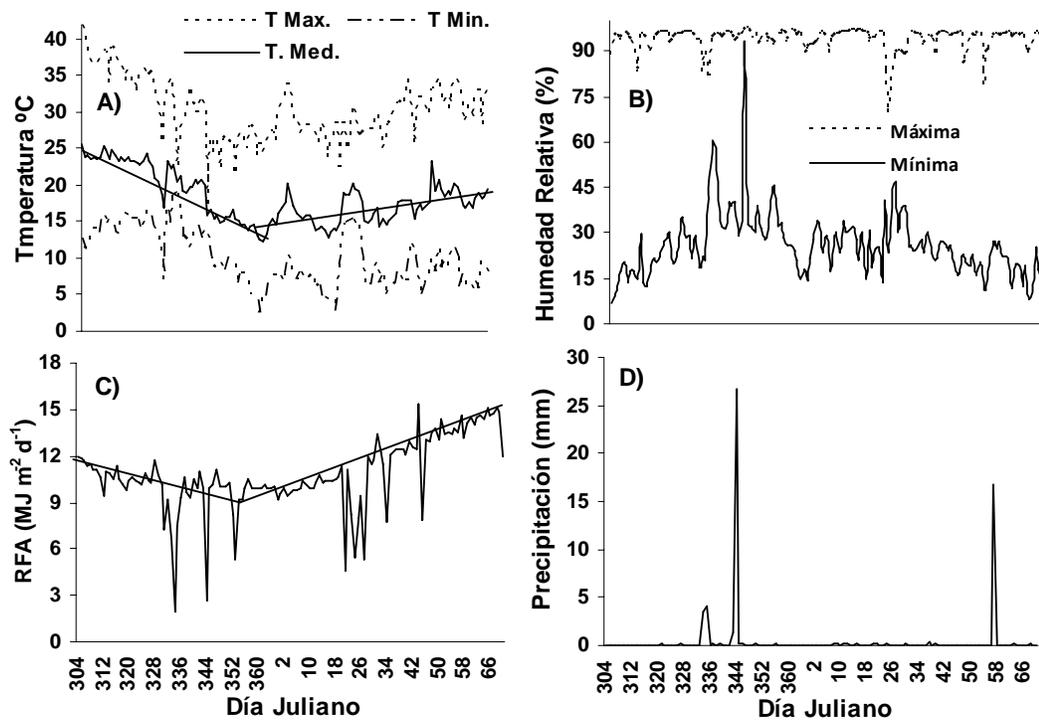


Figura 4. Variables meteorológicas registradas en la estación automatizada Batequis en el Campos Experimental Valle del Fuerte, del 30 de octubre de 2007 al 10 de marzo del 2008. A) Temperatura del aire (°C); B) Humedad relativa (%); C) Radiación fotosintéticamente activa (MJ m⁻² d⁻¹); y D) Precipitación (mm). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

4.2. Etapas fenológicas

Se encontraron diferencias altamente significativas entre fechas de siembra ($P < 0.01$) para emergencia (EM) y para inicio de tuberización (IT), en la PFS la EM y el IT fueron dos y cuatro días antes con respecto a la SFS, por lo que fue marginal el efecto de la temperatura en estas etapas fenológicas.

Entre dosis de N, las diferencias fueron altamente significativas ($P < 0.01$) en el inicio de la formación de estolones (IFE) y para el IT, en ambos casos el número de días se incrementó con el aumento de la dosis de N, lo cual reafirma que la disponibilidad de N retrasa el IT señalado por diversos autores (Vos y Biemond, 1992; Salisbury y Ross, 1994; Saluzzo *et al.* 1999; Jackson, 1999). La EM no fue afectada por la dosis de N, lo cual puede ser debido a que al inicio del ciclo del cultivo el N disponible en el suelo es suficiente para satisfacer la demanda del cultivo.

Los cultivares presentaron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) en el IT, en FL-1867 el IT ocurrió cuatro y cinco días primero con respecto a la variedad Atlantic y Alpha. En ambas fechas de siembra, Alpha fue la variedad más tardía mientras que FL-1867 fue el cultivar más precoz (Cuadro 4).

Las etapas de desarrollo uno y dos (EDI y EDII) en la PFS del cultivo necesitaron más GDD para completarse, aunque en ambas fechas de siembra ocurrió en un número de días similares. De acuerdo con Kooman *et al.* (1996) el inicio de la tuberización es más lento con temperaturas por encima de los 20 °C, situación que prevaleció durante 40 días después de la primera fecha de siembra y pueda haber provocado retraso del inicio de tuberización.

La etapa de desarrollo tres (EDIII), comprendida entre el inicio de la floración y la madurez fisiológica, se prolongó por mayor tiempo en la SFS por efecto temperaturas más frescas durante el ciclo del cultivo (temperatura media

de 16.5 °C), en ese sentido Kooman et al. (1996) indican que la EDIII se recorta con altas temperaturas.

Cuadro 4. Principales fases fenológicas de tres variedades de papa, en dos fechas de siembra, cultivadas en condiciones de riego. Guasave, Sinaloa, México. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

FECHA DE SIEMBRA DEL 30 OCTUBRE DEL 2007									
Variedad	TA	EDI		EDII			EDIII		
		EM	IR	IFE	IT	IF	PF	FC	MF
Alpha	DDE	0	14	16	22	27		41	69
	GDD		208	241	322	378		520	864
Atlantic	DDE	0	12	18	20	26	32	40	67
	GDD		186	280	313	383	450	529	842
FL-1867	DDE	0	8	14	17	18	24	36	61
	GDD		129	224	269	286	376	510	794
FECHA DE SIEMBRA DEL 20 NOVIEMBRE DEL 2007									
Alpha	DDE	0	13	14	23	32		50	79
	GDD		137	159	235	353		560	936
Atlantic	DDE	0	13	16	25	31	42	49	71
	GDD		131	161	260	339	452	553	823
FL-1867	DDE	0	9	14	18	27	32	39	65
	GDD		89	142	177	290	350	423	746

TA= Tiempo acumulado; EM= Emergencia; IR= Inicio de ramificación; IFE= Inicio de formación de estolones; IT= Inicio de tuberización; IF= Inicio de floración; PF= Plena floración; FC= Fruto tamaño canica; MF= Madurez fisiológica; DDE= Días después de la emergencia; GGD= Grados días de desarrollo. ED=Etapa de desarrollo.

En la PFS, la plena floración (PF) se presentó en 45% de las plantas de las variedades Atlantic y FL-1867, y 15% en Alpha, mientras que en SFS, la PF fue aún menor (5%) en todos los cultivares.

4.3. Índice de Área Foliar (IAF)

Durante la primera semana después de la emergencia el IAF fue bajo, posteriormente, en la segunda y primera fecha de siembra, aumentó rápidamente entre los 400 y 470 GDD. El IAF máximo se presentó en la etapa de floración y a partir de entonces se observó un descenso gradual debido a la senescencia de las hojas inferiores (Figura 5). Este comportamiento se ha observado en otras investigaciones (MacCollum, 1978; Vos y Biemond, 1992; Jefferies y Mackerron, 1993).

Los efectos de la fecha de siembra, y la interacción entre la fecha de siembra y el cultivar en el IAF máximo fueron significativos ($P < 0.05$). La primera fecha tuvo mayor IAF máximo (3.66) que la segunda fecha (3.43). Los cultivares Alpha y Atlantic mantuvieron IAF máximos semejantes en ambas fechas de siembra; en cambio el IAF máximo de FL-1867 fue 18 % más alto en la primera que en la segunda fecha de siembra lo que se atribuye a una sensibilidad mayor de este genotipo a las bajas temperaturas en la segunda fecha de siembra (Figura 6).

Entre cultivares se observaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$). La variedad Alpha presentó el mayor IAF en la mayoría de las dosis de N, en ambas fechas de siembra; esta variedad fue 5 % y 21 % superior a FL-1867 y 14 % y 13 % superior a Atlantic en la PFS y SFS, respectivamente.

Los IAF máximos fueron desde 2.41 en el cultivar FL-1867 en la SFS y sin aplicación de nitrógeno, hasta 4.41 en Alpha en la PFS y con 300 kg N ha^{-1}

(Figura 7), lo cual coincide con los máximos IAF de 2.5 a 5.5 reportados por Dyson y Watson (1971). Sale (1973) señala que los IAF mayores a 3.5 están asociados con altas densidades de población (mayores a 44,000 plantas ha⁻¹). En cambio, el cultivar FL-1867 sólo sobrepasó este IAF en la primera fecha de siembra y con fertilización nitrogenada, mientras que el cultivar Atlantic apenas si lo alcanzó.

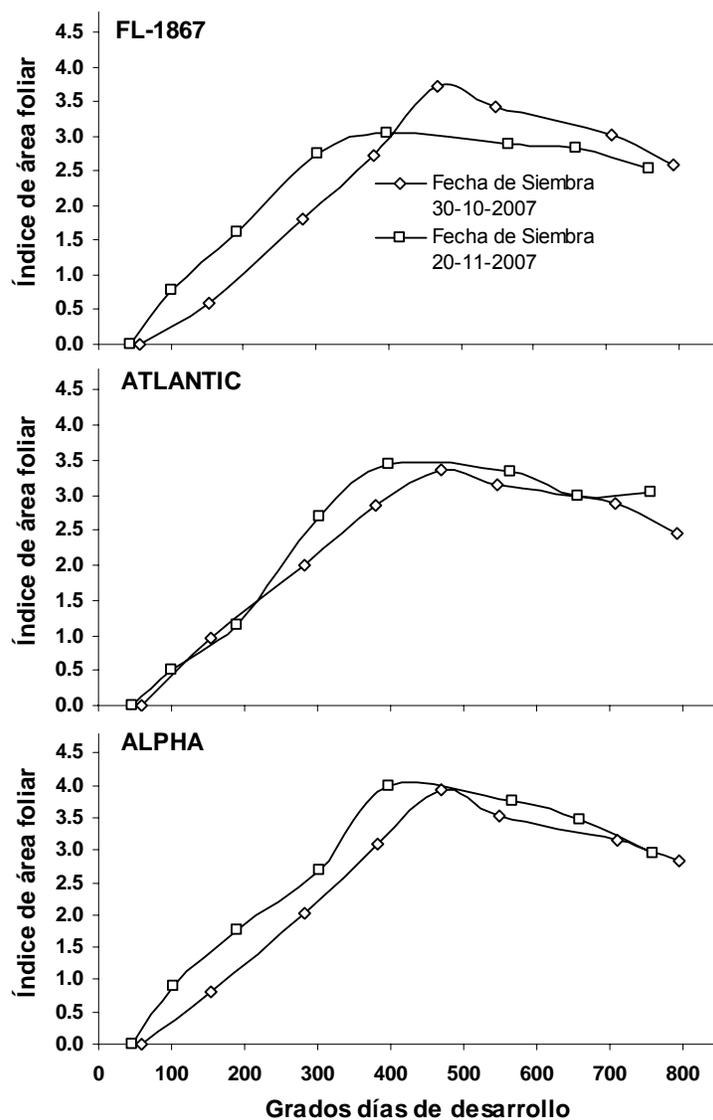


Figura 5. Índice de área foliar de tres variedades de papa en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

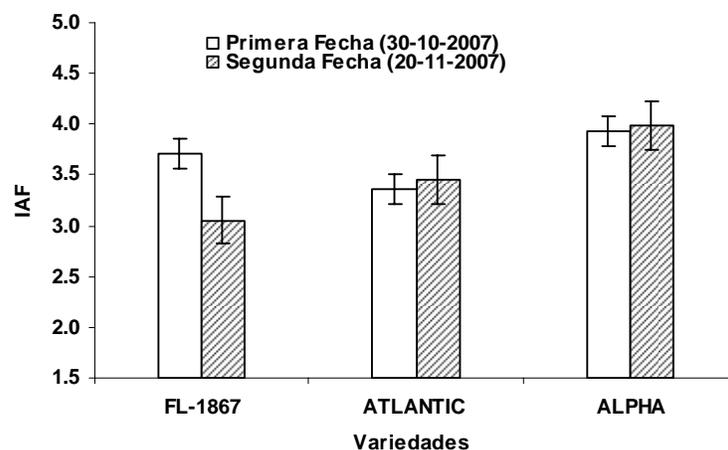


Figura 6. Índice de área foliar máximo de tres variedades de papa en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

Se encontraron diferencias altamente significativas del efecto de la dosis de nitrógeno en el IAF máximo ($P \leq 0.01$). El IAF máximo incrementó con el aumento de la fertilización nitrogenada hasta alcanzar el mayor con 300 kg N ha^{-1} . Sin nitrógeno, se alcanzó un IAF máximo de 3.12, lo cual es 19 % inferior que con 300 kg N ha^{-1} ; en cambio sólo se encontraron diferencias de 9 y 2 % en el IAF máximo entre la mayor dosis de nitrógeno aplicada con respecto a 100 y 200 kg N ha^{-1} . Estos resultados concuerdan con los obtenidos en papa por Kleinkopf *et al.* (1981) y Casa y Jones (2003) quienes encontraron diferencias altamente significativas en IAF al estudiar diferentes niveles de nitrógeno. En ese mismo sentido Genova (1983) indica que el IAF máximo cambia en función de la fertilización.

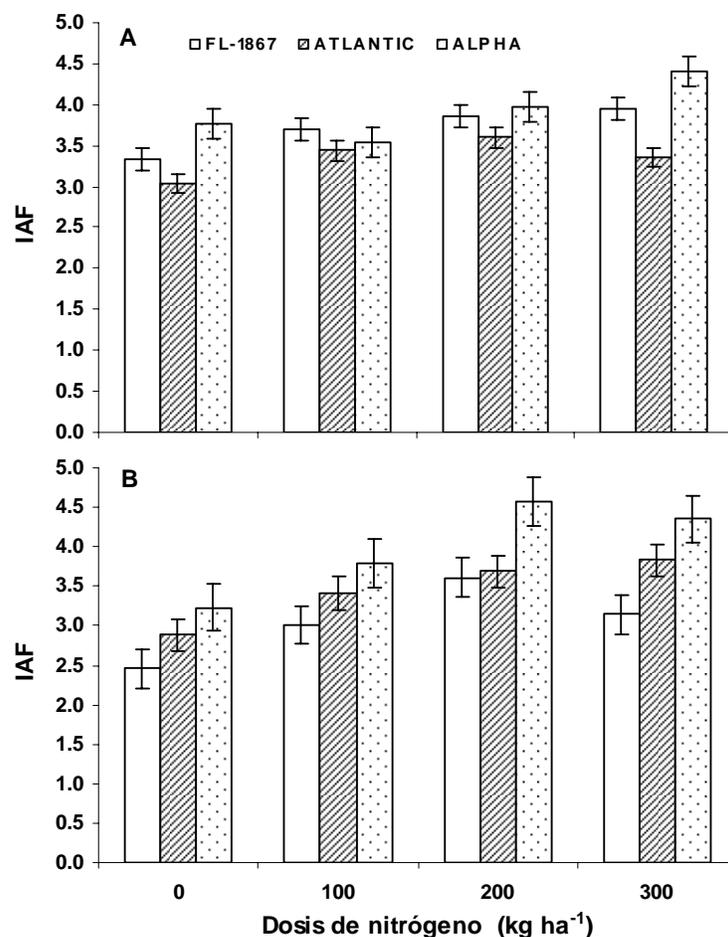


Figura 7. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre el IAF máximo en tres variedades de papa, en la A) PFS (30-10-2007) y B) SFS (20/11/2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

4.5. Área foliar específica (AFE)

El AFE inicial en la etapa de formación de estolones alcanzó 305.5 cm² g⁻¹ en promedio, 284.9 al inicio de floración y posteriormente decreció a 274.6 cm² g⁻¹ en la madurez fisiológica; es decir, conforme se incrementó la biomasa seca, disminuyó el AFE. Al respecto, Pérez *et al.* (2004) mencionan que el AFE decrece durante el transcurso del ciclo; lo anterior puede ser atribuido a los

cambios en la relación fuente-demanda de los tejidos en crecimiento (Johnson y Thornley, 1983).

No se encontraron diferencias significativas de AFE entre variedades, lo cual es similar a lo encontrado por Wroniak (2006) en los cultivares Bekas y Maryna. Las AFE en nuestro estudio, difieren de las reportadas por Mora (1998) en cinco cultivares de papa, que fueron de 75 a 110 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ en la misma etapa; en cambio son semejantes a 233 y 264 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ en 1997, y 207 y 236 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ en 1998, reportadas por Delden *et al.* (2000) en las variedades Agría y Junior, y a las encontradas por Jenkins y Mahmood (2003) en el cultivar Rocket de 190.1 a 299.4 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ con tratamientos de nitrógeno, fósforo y potasio.

Se observaron diferencias altamente significativas entre dosis de N ($P < 0.01$); el AFE se redujo con el incremento de N (Figura 8). Esto difiere a lo reportado por Vos (1995) quien menciona que el AFE de papa no es afectado por el suministro de N, pero sí por el número de tallos por unidad de superficie.

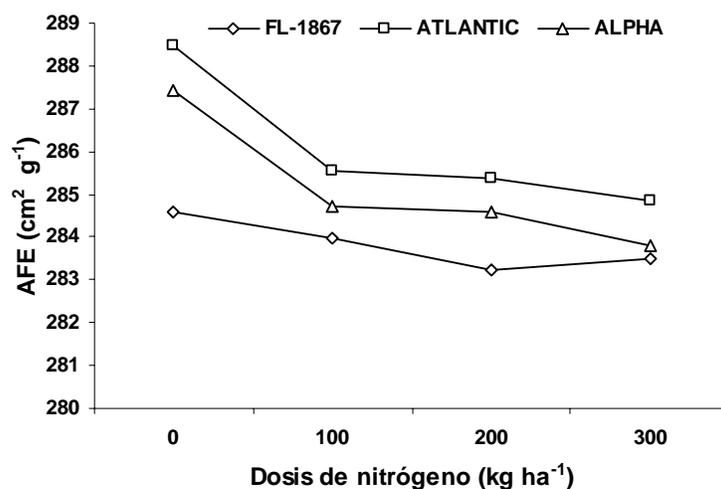


Figura 8. Relación entre la dosis de nitrógeno y el AFE. Guasave, Sinaloa.

Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

4.8. Coeficiente de extinción (k)

Se encontraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en el k entre fechas de siembra. El máximo k fue en el cultivar Alpha (0.61) en PFS, mientras que en la SFS, el cultivar FL-1867 mostró el k más alto (0.56) (Figura 9). Los k obtenidos en este estudio coinciden con los reportados en papa por Khurana y McLaren (1982) (0.60), Jefferies y Heilbronn (1991) (0.58), Gordon *et al.* (1997) (0.61), y De la Casa *et al.* (2008) (0.61). Pero son superiores al 0.54 sugerido por Firman y Allen (1989) y 0.4 sugerido por Haverkort (2007).

No hubo diferencias significativas entre dosis, ni cultivares. El k no presentó una relación clara con el IAF (Figura 10), esto coincide con diversos autores (Khurana y McLaren, 1982; Burstall y Harris, 1983; De la Casa *et al.*, 2008), Kiniry *et al.* (2005) reportan que el k presenta un comportamiento inconsistente con respecto al incremento del IAF y de acuerdo a Gordon *et al.* (1997) se debe principalmente al ángulo y orientación de las hojas, a cambios en la longitud de los tallos y en el desarrollo dosel.

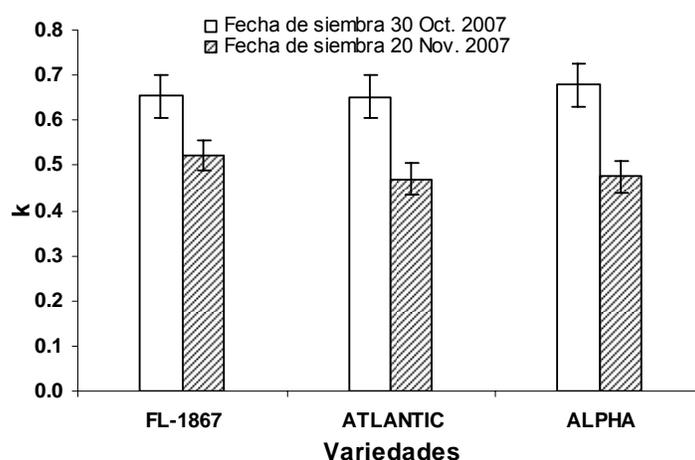


Figura 9. Coeficiente extinción de luz en cultivares de papa, en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

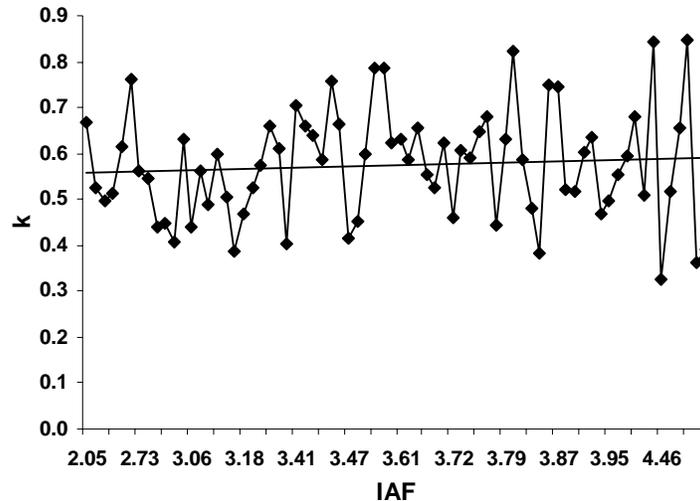


Figura 10. Relación entre el IAF y el k. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

4.6. Fracción de radiación interceptada en la banda fotosintética (FRI)

La FRI máxima se presentó en la etapa de floración y coincide con el IAF máximo. Entre los cultivares se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$). La variedad Alpha tuvo la mayor FRI máxima en ambas fechas de siembra, seguida por FL-1867 y por último Atlantic (Figura 11).

En las fechas de siembra se observaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$). La FRI máxima fue 10 % mayor en la primera fecha de siembra en promedio de todos los cultivares estudiados (Figura 11). También se encontró que FRI máxima incrementó conforme se aumentó la dosis de nitrógeno ($P < 0.01$) (Figura 12), lo cual coincide con otros autores Shah *et al.* (2004) quienes señalan que la radiación interceptada en papa se incrementa conforme aumenta la dosis de fertilización nitrogenada.

En la Figura 13 se muestra una relación cuadrática entre la FRI máxima y el IAF ($P < 0.01$), en donde se asume una relación de causa-efecto debido a que el nivel de intercepción de la RFA depende de la cantidad de área foliar disponible para capturarla (Gardner *et al.*, 1985). También se puede observar que con un IAF mayor a 3, los incrementos en la FRI son pequeños; en ese sentido Khurana y McLaren (1982) señalan que en papa, la FRI se incrementa linealmente hasta un IAF de 2.25, después los incrementos son pequeños hasta un IAF 4.0 cuando se alcanza el 95% de la radiación absorbida, a partir de entonces, los incrementos en el IAF causan senescencia de las hojas inferiores y es posible que esto propicie el descenso de la FRI.

El k y la FRI presentaron una relación directamente proporcional ($P < 0.01$) (Figura 14), lo que explica que a la atenuación de la radiación es mayor por incremento de la intercepción de radiación por el dosel vegetal (Campbell y Norman, 1989).

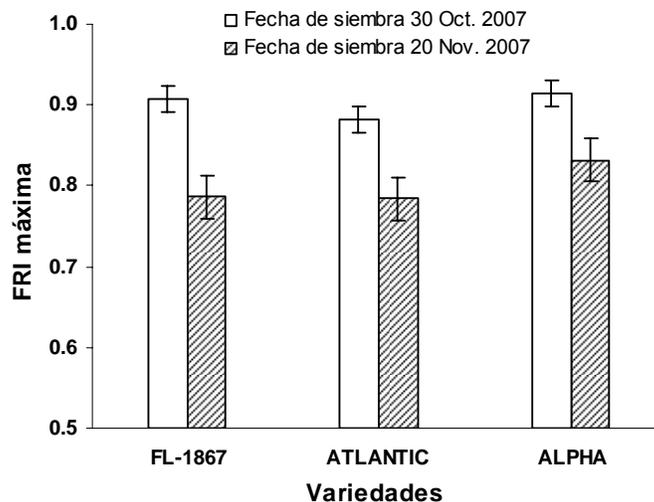


Figura 11. FRI máxima de tres variedades de papa en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo O-I. 2007/2008.

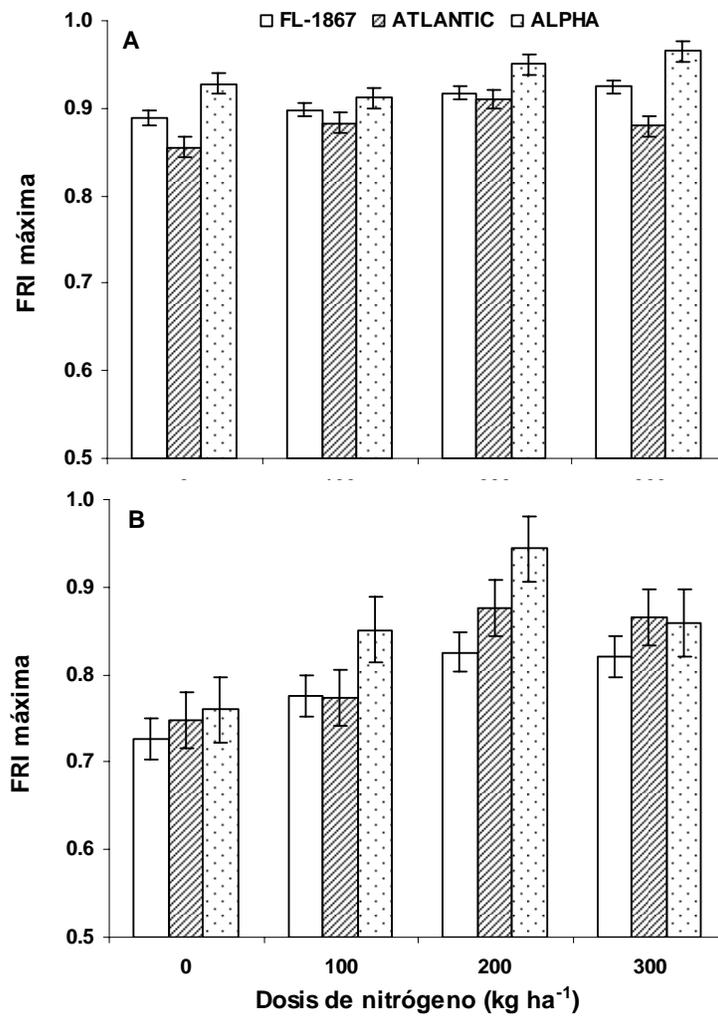


Figura 12. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre la FRI máxima de tres variedades de papa. A) PFS (30/10/2007) y B) SFS (20/11/2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo: O-I.2007/2008.

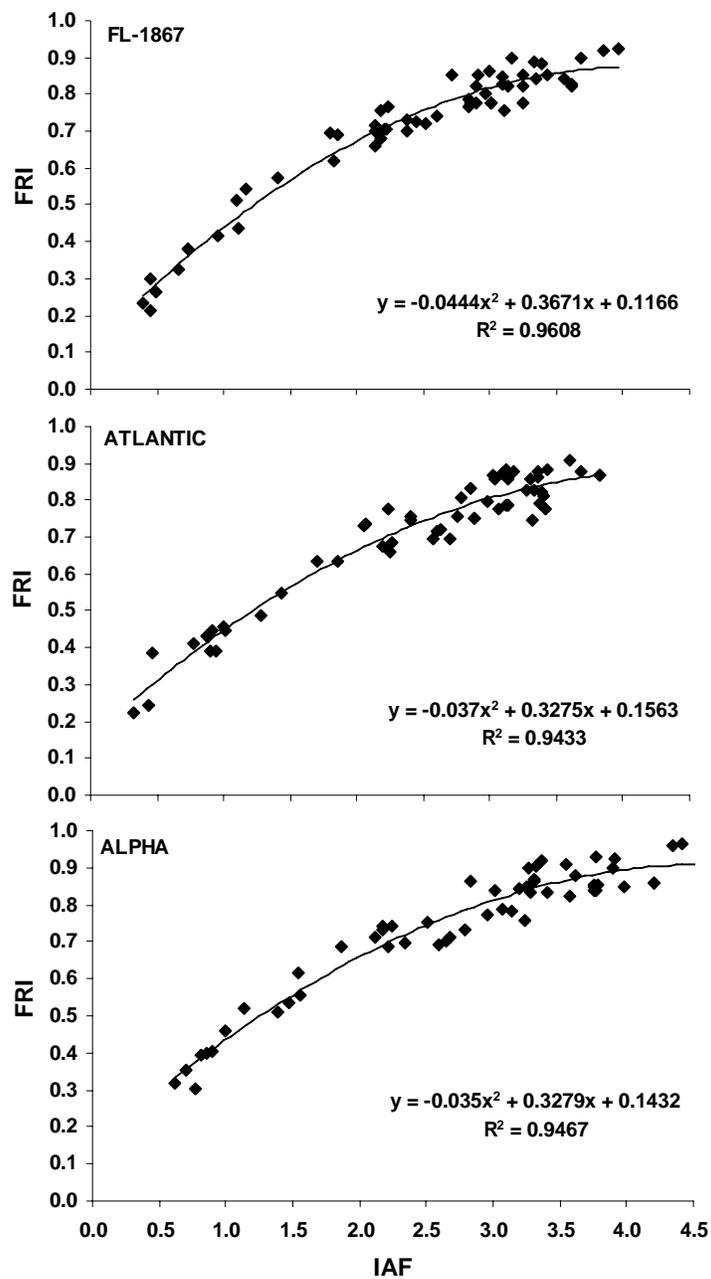


Figura 13. Relación entre el IAF y la FRI de tres variedades de papa.

Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

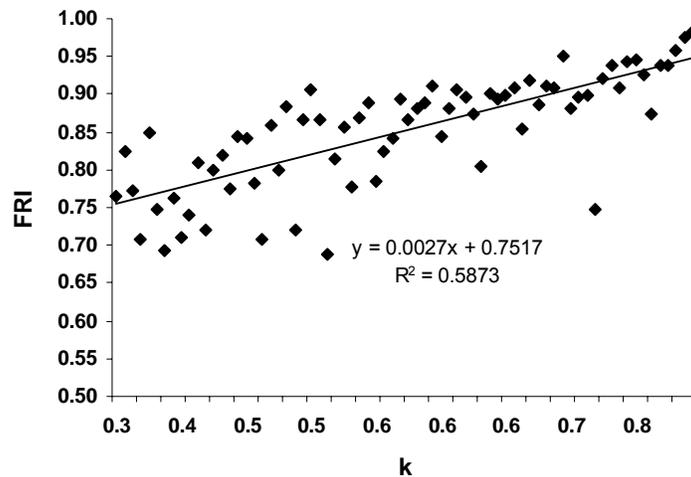


Figura 14. Relación entre FRI y k. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

4.7. Acumulación de Biomasa

No se encontraron diferencias para acumulación de biomasa ($P > 0.05$), en la SFS fue de 1551 g m^{-2} y en la PFS de 1359 , en cuanto a nitrógeno fue de 1660 , 1602 , 1312 y 1245 g m^{-2} para la dosis de 300 , 200 , 0 y 100 kg N ha^{-1} . El cultivar Alpha presentó la mayor acumulación de biomasa, seguida de Atlantic y finalmente FL-1867 (1483 , 1458 y 1425 g m^{-2} respectivamente). No se encontró asociación entre la acumulación de biomasa y el IAF, pero si con la RFA interceptada acumulada ($P < 0.01$) (Figura 15).

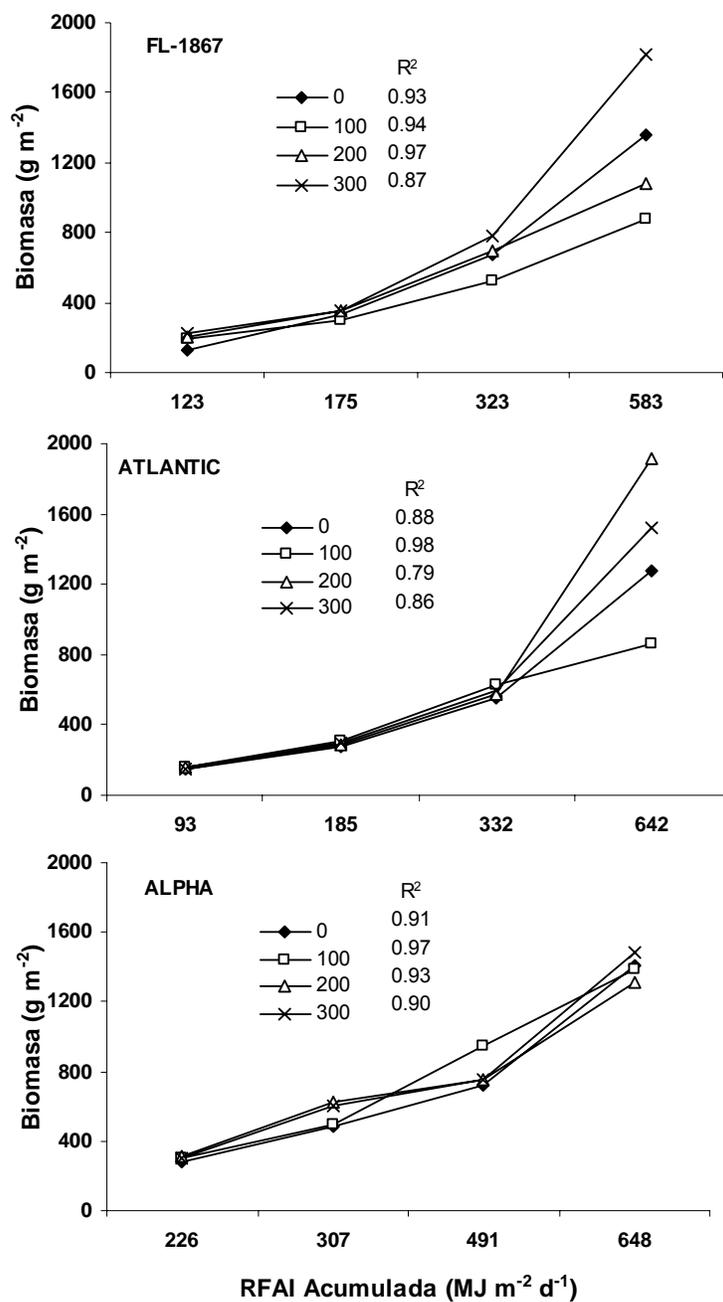


Figura 15. Acumulación de biomasa en función de la RFAI acumulada de tres variedades de papa y cuatro dosis de N. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

4.9. Eficiencia en uso de la radiación en la banda fotosintética (EUR)

FL-1867 presentó las EUR más altas (3.03 y 3.30 g MJ), seguida por Atlantic (2.96 y 3.04 g MJ), mientras que la variedad Alpha mostró las menores EUR (2.82 y 2.66 g MJ) en la primera y segunda fecha de siembra respectivamente (Figura 16). Estos resultados coinciden con los de Haverkort *et al.* (1992) quienes señalan que las variedades precoces presentan mayor EUR con respecto a los cultivares tardíos. Las EUR en nuestra investigación coinciden con las reportadas por Khurana y McLaren (1982), quienes obtuvieron EUR de 3.42 y 2.49 en 1979 y 1980, pero son superiores a 1.18 g MJ d⁻¹ reportada por Koopman (1995).

En cuanto a dosis de nitrógeno se presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) con 1.83 g MJ en el cultivar Atlantic y 100 kg N ha⁻¹, hasta 4.11 g MJ en FL-1867 y 300 kg N ha⁻¹, ambos en la primera fecha de siembra (Figura 17). Un valor de EUR mayor a 4.0 es muy alto, pero existen reportes en Escocia por Jefferies y MacKerron (1989) en donde se obtuvieron 3.9 g MJ⁻¹. También, Nishibe *et al.*, 1989 reportan 3.8 g MJ⁻¹ en papa cultivada en Japón.

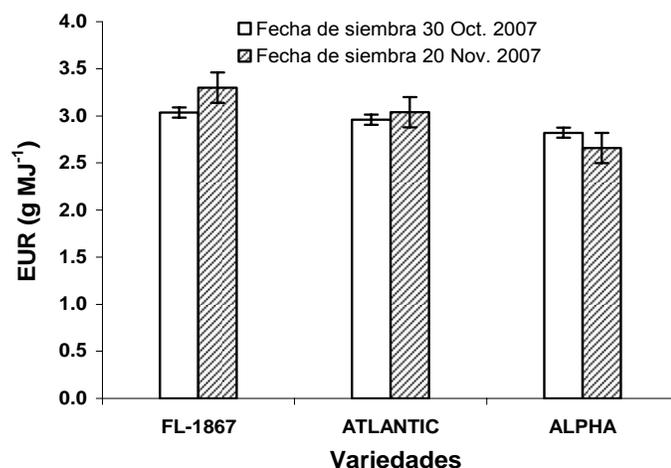


Figura 16. EUR en tres variedades de papa en dos fechas de siembra.

Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

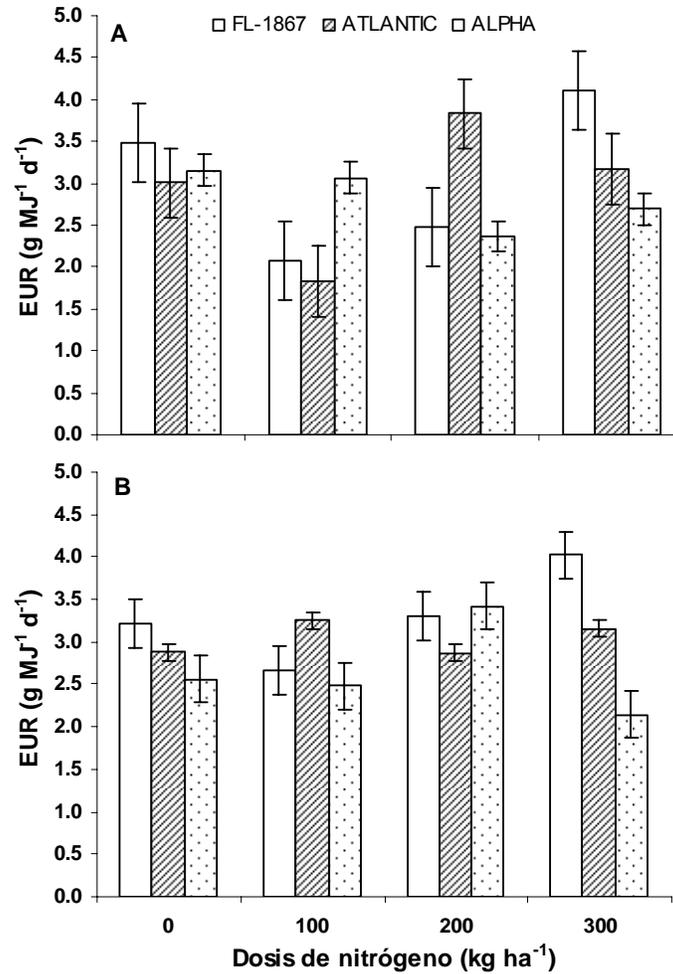


Figura 17. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre la EUR de tres cultivares de papa en la: A) PFS (30/10/2007) y B) SFS (20/11/2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

4.10. Índice de cosecha (IC)

No se encontraron diferencias en el IC en los tratamientos ($P > 0.05$) (Cuadro 5). Los IC en nuestra investigación coinciden con los de otros autores (Sibma, 1977; Van der Zaag, 1984; Van der Zaag, 1985). El IC de Alpha fue menor al 0.92 reportado por Mora (1998) y mayor a 0.68 reportado por Gmelig

y Bodlaender (1981) o 0.57 a 0.66 y 0.61 a 0.74 reportados para los cultivares Agria y Junior (van Delden, 2001).

En el Cuadro 5 se observa una tendencia del IC a decrecer al incrementar la dosis de N; esto confirma que un nivel alto de nitrógeno puede reducir el porcentaje de materia seca enviado a los tubérculos, en cambio favorece la formación de hojas y tallos (Millard y Marshall, 1986; Ojala *et al.*, 1990; Cieslik, 1997; Giletto *et al.*, 2007).

4.11. Contenido materia seca de tubérculo (MST)

En cuanto al contenido de MST, hubo diferencias altamente significativas entre variedades y dosis de nitrógeno ($P < 0.01$). La variedad FL-1867 presentó 24.7 y 21.8% de MST en la PFS y SFS, mientras que Atlantic presentó 21.2 y 22.5% en la primera y segunda fecha de siembra; estos valores son similares al obtenido por Andreu y Silva (2007) de 21.6%, en el cultivar Atlantic. La MST de Alpha fue de 20.4% en la PFS y 22.3% en la SFS; estos valores son bajos en comparación con los reportados por Badillo *et al.* (2004) en Alpha de 26.9 y 25.9% durante los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno, con 180 y 250 kg ha⁻¹ de N respectivamente, en el Bajío. Se encontró que al incrementar la dosis de nitrógeno se reduce el contenido de MS en los tubérculos (Cuadro 5), lo cual coincide con diversos autores (Kleinkopf *et al.*, 1981; Jenkins y Nelson, Vos, 1997; 1992; Jenkins y Mahmood, 2003; Giletto *et al.*, 2007; Goffart *et al.*, 2008).

Cuadro 5. Índice de cosecha y contenido de materia seca en tubérculos (MST) en dos fechas de siembra, cuatro dosis de nitrógeno y tres variedades de papa. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

FACTOR DE VARIACION	NIVEL	VARIABLE	
		IC	MST
Fecha de siembra	30 octubre 2007	80.6 a	22.1 a
	20 noviembre 2007	80.1 a	22.2 a
Dosis de nitrógeno	0	79.7 a	23.0 a
	100	80.6 a	22.6 a
	200	81.2 a	21.9 b
	300	79.9 a	21.1 c
Cultivares	FL-1867	79.8 a	23.2 a
	Atlantic	81.3 a	21.8 b
	Alpha	80.0 a	21.4 c
Media		80.4	22.2
C.V.		3.02	2.0
DMS (Fecha de siembra)		2.09* ns	0.21* ns
DMS (Dosis de nitrógeno)		3.98* ns	0.39** ss
DMS (Cultivares)		3.11* ns	0.48** ss

* Tukey 0.05 ** Tukey 0.01 ns no significativo ss alta significancia

4.12. Rendimiento (REN)

Se encontraron diferencias altamente significativas en el rendimiento de tubérculos entre fechas de siembra y cultivares ($P < 0.01$), el rendimiento de

tubérculo fue superior en la PFS (31.8 t ha⁻¹) que en la SFS (28.7 t ha⁻¹) (DMS Tukey.01=1.6).

En cuanto a los cultivares, Atlantic tuvo una media de 32.3 t ha⁻¹, seguida por Alpha 29.8 t ha⁻¹ y la menos rendidora fue FL-1867 con 28.6 t ha⁻¹. Los rendimientos variaron de 22.1 hasta 37.3 t ha⁻¹ en los cultivares FL-1867 (cero nitrógeno) y Atlantic (200 kg de N ha⁻¹) en la segunda fecha de siembra, lo cual refleja el efecto de la disminución del IAF y la FRI en el cultivar FL-1867, en cambio se puede observar que el cultivar Atlantic fue favorecido por las condiciones en la SFS (Figura 18B).

En las dosis de N no se encontraron diferencias significativas para rendimiento, el REN comercial se incremento de cero a 200 kg de N ha⁻¹ y disminuyo con 300 kg de N ha⁻¹ fue de 27.91 29.27, 32.79 y 30.91 t ha⁻¹ (Figura 16), Saluzzo *et al.* (1999) indican que una alta disponibilidad de nitrógeno puede prolongar el crecimiento vegetativo, retrasar la tuberización y reducir el rendimiento. No se encontró relación entre el IAF y el rendimiento de tubérculo en fresco.

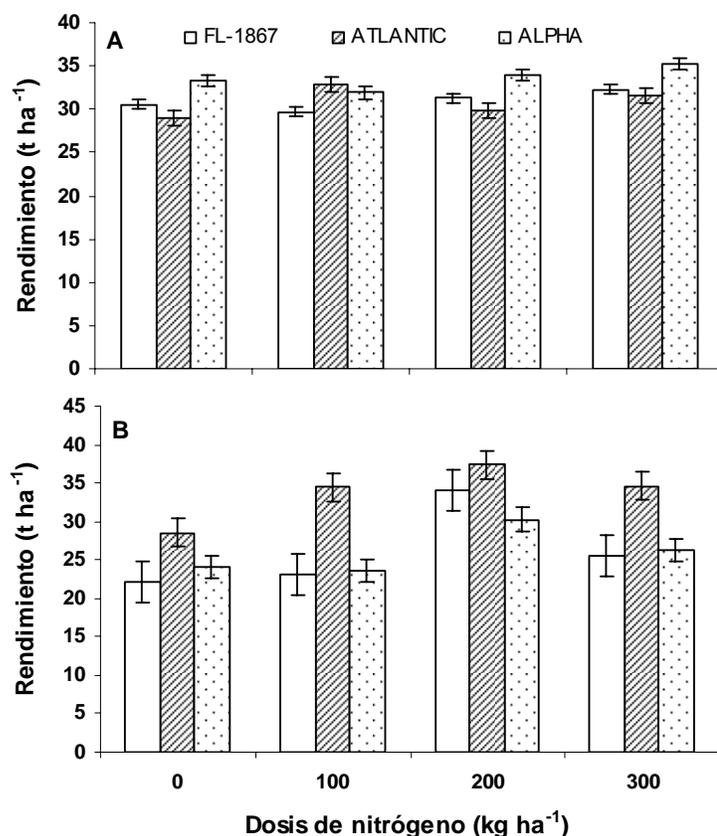


Figura 18. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre el rendimiento de tres cultivares de papa en la: A) PFS (30/10/2007) y B) SFS (20/11/2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

4.12.1. Calidad del tubérculo

Se encontraron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) entre fechas de siembra en la calidad de tubérculo de primera, segunda, cuarta y rezaga. Con respecto a la dosis de N, se observaron diferencias en la producción de primera, cuarta y rezaga ($P < 0.01$) (Cuadro 6). Finalmente, se observaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre dosis de N en la producción de tubérculos de tercera; el número de tubérculos en esta categoría fueron de 11.7, 11.3, 9.4 y 8.7 tubérculos m⁻², para 200, 300, 100 y 0 kg N ha⁻¹

respectivamente, lo cual coincide con otros autores que señalan que el rendimiento y la calidad es afectada por los excesos o deficiencias de nitrógeno (Allison *et al.*, 1999). El rendimiento de tubérculos de primera calidad disminuyó en la segunda fecha de cultivo, pero en cambio se incrementaron los tubérculos de tercera y cuarta calidad (Figura 19).

Cuadro 6. Número de tubérculos de papa por categorías de calidad en dos fechas de siembra, en las variedades FL-1867, Atlantic y Alpha. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

F.V.	NIVEL	Número tubérculos m ⁻²					
		1 ^{ra}	2 ^{da}	3 ^{ra}	4 ^{ta}	Rezaga	Total
FECHA SIEMBRA	30-Oct-07	2.89 a	5.11 a	9.83 a	5.33 b	0.08 b	23 b
	20-Nov-07	1.19 b	3.75 b	10.55 a	11.97 a	1.05 a	29 a
DOSIS N	0	2 bc	5	10	8 ab	0 b	25
	100	3 ab	4	10	7 b	0 b	24
	200	3 a	5	10	8 b	< 1 ab	26
	300	1 b	4	11	12 a	> 1 a	29
	C.V.	51.5	33.74	33.08	45.07	88.47	17.89
	DMS (Tukey)	0.68**	0.96**	1.61*	2.47**	0.36**	2.95**
	DMS (Tukey)	1.175**	2	4	4.29**	0.591**	4

*Tukey 0.05 ** Tukey 0.01

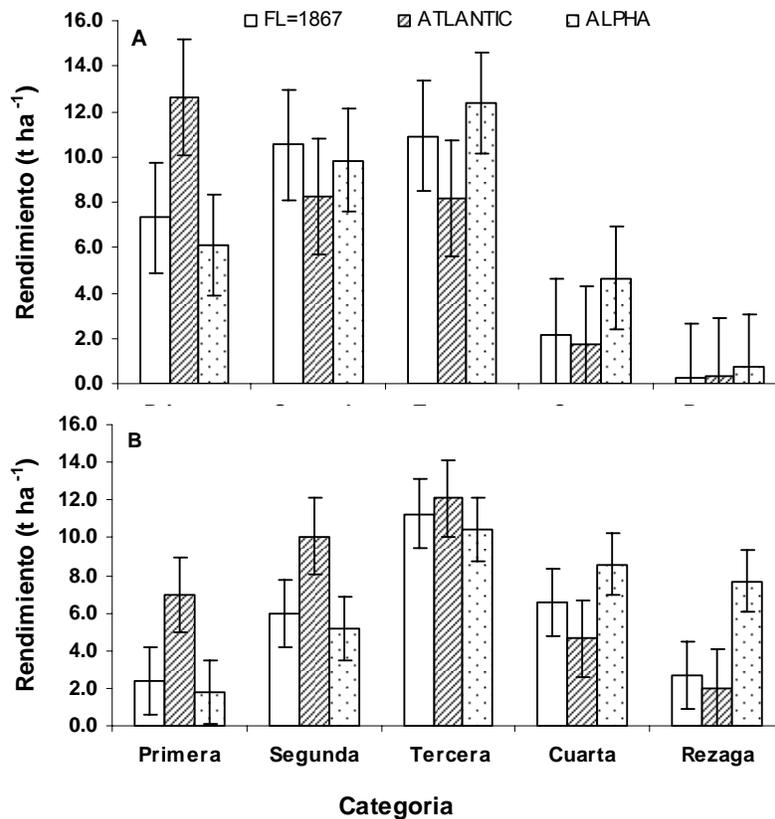


Figura 19. Rendimiento de papa por categorías de calidad en tres cultivares en: A) PFS (30 de octubre de 2007), B) SFS (20 de noviembre de 2007). Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

Se encontraron diferencias altamente significativas, entre fechas de siembra ($P < 0.01$), para el porcentaje de REN de tubérculo de primera, segunda, cuarta y rezaga. En la SFS disminuyó el porcentaje de REN de tubérculos de primera clase pero en cambio incrementó el REN de tercera y rezaga (Cuadro 7). Entre genotipos hubo diferencias significativas ($P < 0.05$) en el porcentaje de REN de segunda; el cultivar FL-1867 fue el que presentó el mayor porcentaje (29%), seguida por Alpha (25%) y finalmente Atlantic (22%). El porcentaje de REN de

tubérculo por categoría de calidad fue similar independientemente de la dosis de nitrógeno (Figura 20).

Cuadro 7. Porcentaje de rendimiento de tubérculos de papa por categoría de calidad en dos fechas de siembra. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

FUENTE VARIACION	NIVEL	Porcentaje de rendimiento de tubérculos				
		1 ^{ra}	2 ^{da}	3 ^{ra}	4 ^{ta}	Rezaga
FECHA SIEMBRA	30-Oct-07	27.5 a	29.4 a	32.8 a	9.4 b	0.8 b
	20-Nov-07	10.0 b	20.5 b	35.7 a	20.0 a	13.8 a
	C.V.	69.13	35.90	31.29	57.72	117.64
	DMS (Tukey)	8.2**	5.6**	5.1*	5.3**	5.4**

*Tukey 0.05 ** Tukey 0.01

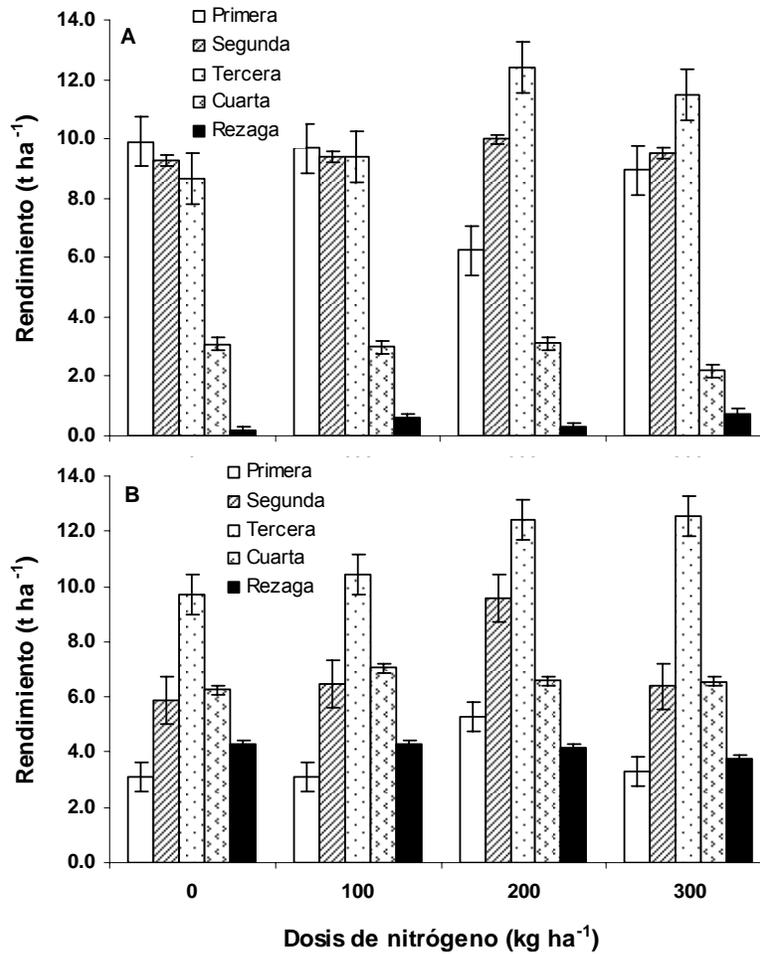


Figura 20. Calidad del tubérculo de papa y dosis de nitrógeno en la A) PFS y B) SFS. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008

4.13. Resultados del modelo de papa

El modelo propuesto predice el rendimiento con un error medio de 2.2 % en la primer fecha de siembra, y 42.7 % en la segunda fecha de siembra. En esta última fecha, el rendimiento modelado es mayor al observado debido a que la temperatura es más cercana a la óptima para el crecimiento de papa, y esto causa que el periodo de captación de radiación solar incremente y entonces se envía mayor cantidad fotosintatos para el crecimiento de los

tubérculos (Cuadro 8). Además, el modelo no consideró el efecto de las bajas temperaturas en el IAF, y FRI.

El porcentaje medio de error entre REN observado y modelado fue 4.7, 0.4 y 4.0 % para los cultivares FL-1867, Atlantic y Alpha respectivamente, por lo que la predicción es aceptable. La mayor estabilidad mostrada por Atlantic se refleja en el menor error obtenido. En cambio el error entre el rendimiento modelado y observado fue considerable para las dosis de N varió de 12.1 a 29.8 %.

Cuadro 7. Rendimientos observados y simulados en la PFS en cuatro dosis de nitrógeno y tres variedades de papa. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

Dosis de N	Variedad	Rendimiento	
		Simulado	Observado
0	FL-1867	34.4	30.5
0	Atlantic	25.3	29.7
0	Alpha	34.7	31.3
100	FL-1867	31.6	32.3
100	Atlantic	30.3	28.9
100	Alpha	34.6	32.8
200	FL-1867	37.0	29.9
200	Atlantic	26.5	31.6
200	Alpha	36.2	33.3
300	FL-1867	36.2	31.9

300	Atlantic	28.2	33.9
300	Alpha	35.1	35.3

Cuadro 8. Rendimientos observados y simulados en la SFS bajo cuatro dosis de nitrógeno y tres variedades de papa. Guasave, Sinaloa. Ciclo otoño-invierno 2007/2008.

Dosis de N	Variedad	Rendimiento	
		Simulado	Observado
0	FL-1867	41.5	22.1
0	Atlantic	33.3	23.1
0	Alpha	40.9	34.1
100	FL-1867	39.3	25.5
100	Atlantic	37.3	28.6
100	Alpha	40.9	34.5
200	FL-1867	43.4	37.3
200	Atlantic	34.3	34.6
200	Alpha	42.2	24.1
300	FL-1867	42.8	23.6
300	Atlantic	35.7	30.2
300	Alpha	41.3	26.2

V. DISCUSION GENERAL

En la hipótesis se planteó que con la segunda fecha de siembra se obtendría un mayor rendimiento. Lo anterior se debe a que por lo general, al inicio del ciclo se registran altas temperaturas ($>25\text{ }^{\circ}\text{C}$) que reducen la translocación de carbohidratos al tubérculo y en consecuencia el rendimiento (Gawronska *et al*, 1988), mientras que a medida que el ciclo avanza las temperaturas van descendiendo y se presentan temperaturas favorables para el crecimiento de estolones (20° C , según Rousselle *et al.*, 1996) y para la formación y desarrollo del tubérculo ($18\text{ a }22\text{ }^{\circ}\text{C}$, de acuerdo con Manrique, 1993). Sin embargo, la temperatura media en esta fecha fue $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual es menor que la temperatura considerada optima ($18\text{ a }22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Además se observaron 19 días con bajas temperaturas. Estas temperaturas bajas durante el experimento se consideran atípicas debido a que la media en este periodo, con base en registros de seis años, es $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De acuerdo con los resultados, las temperaturas bajas que afectaron la segunda fecha de siembra no redujeron el rendimiento de tubérculo en la primera fecha de siembra ya que cuando se presentaron, el desarrollo de tubérculo era avanzado. Se logró obtener un mayor rendimiento de tubérculo en la primera fecha debido al mayor desarrollo foliar e intercepción de radiación. En cambio, el número de tubérculos fue mayor en la SFS, aunque de menor tamaño, lo cual puede explicarse por el incremento en la formación de estolones, promovidos por las temperaturas bajas (Jackson, 1999).

El rendimiento aumentó con la dosis de N hasta 200 kg de N ha⁻¹ y posteriormente disminuyó sin encontrarse diferencias significativas entre dosis. Este patrón de incremento del rendimiento por efecto de la aplicación de nitrógeno ha sido documentado anteriormente en papa (Millard y Marshall, 1986; Ojala *et al.*, 1990; Cieslik, 1997; Saluzzo *et al.*, 1999; Belanger *et al.*, 2000; Giletto *et al.*, 2007), y es una respuesta común en otros cultivos (Fisher *et al.*, 2002; Schmidt *et al.*, 2002; Ronald *et al.*, 2005). La respuesta similar del rendimiento de papa por efecto de la dosis de nitrógeno puede atribuirse al nitrógeno mineral presente en el suelo, que no se consideró en el análisis de los resultados. El incremento de rendimiento de papa por efecto de la disponibilidad de nitrógeno ocurre a tasas más elevadas cuando el nivel de nitrógeno disponible es bajo que cuando es alto (Vos, 1997; Haverkort *et al.*, 2003). Así, es posible que el nitrógeno residual fuera suficiente para alcanzar un rendimiento similar en todos los niveles de nitrógeno evaluados en esta investigación. Este resultado sugiere la necesidad de considerar el efecto del nitrógeno residual para calcular el rendimiento de papa.

Además, la falta de respuesta del rendimiento a la dosis de nitrógeno puede atribuirse a que con mayor dosis se estimula un mayor desarrollo vegetativo (Figura 4). La estimulación y prolongación del desarrollo vegetativo retrasa la tuberización y además causa una competencia por la partición de fotosintatos hacia los tubérculos (Vos y Biemond, 1992; Salisbury y Ross, 1994; Saluzzo *et al.*, 1999).

Los cultivares Atlantic y Alpha presentaron mayor estabilidad en el rendimiento que FL-1867. La menor estabilidad sugerida en este cultivar se debe a que las temperaturas bajas afectaron más evidentemente el IAF, la FRI y por lo tanto rendimiento.

El modelo propuesto predice el rendimiento con un error menor a 2.2% en la primer fecha de siembra, en cambio el error es 42.7% en la segunda fecha de siembra. De acuerdo con la hipótesis, en la SFS se esperaría un mayor rendimiento y esto se fundamenta en que conforme la temperatura es más cercana al óptimo, se incrementa el periodo de captación de radiación solar, lo cual resulta en un incremento del rendimiento, pero esto difiere con los resultados observados. El modelo coincide con lo esperado en la hipótesis respecto a un mayor rendimiento en la SFS. El error mayor en la SFS se debe a que el modelo no considera el efecto de las temperaturas extremas registradas (2 y 5 °C) durante prácticamente todo el ciclo de cultivo en le SFS (Figura 1A) que influyeron negativamente en el IAF, en la FRI y por lo tanto afectaron el rendimiento de tubérculo.

VI. CONCLUSIONES

La fecha de siembra afectó el ciclo vegetativo del cultivo ya que las temperaturas altas en la primera fecha de siembra redujeron los días a emergencia, inicio de tuberización y madurez fisiológica. En cambio, la disminución de IAF, k, FRI y REN en la segunda fecha de siembra se atribuyó al efecto de bajas temperaturas (entre 2 y 5 °C). El cultivar FL-1867 fue el más sensible a las bajas temperaturas, al causar reducción en el IAF y la FRI máxima, por lo que refleja la importancia de la interacción genotipo y fecha de siembra.

Los genotipos también fueron diferentes en su respuesta fenológica. La variedad Alpha fue la más tardía y en cambio FL-1867 fue la más precoz. Alpha también se caracterizó por producir mayor IAF y por consiguiente presentó una mayor FRI. En cambio, FL-1867 tuvo las mayores EUR y MST, pero fue Atlantic con el mayor rendimiento de tubérculo. El AFE, k y IC fueron similares entre cultivares.

El incremento de nitrógeno retrazó el inicio de la formación de estolones y la tuberización, en cambio aumentó el IAF, FRI, EUR y la biomasa. El rendimiento de tubérculo incrementó sólo marginalmente de cero a 200 kg de N ha⁻¹ y cuando la dosis aumentó más, se favoreció el desarrollo vegetativo pero disminuyó la producción de tubérculos. También afectó negativamente al AFE y la MST.

El modelo predice el rendimiento con un nivel aceptable de confiabilidad para la primera fecha de siembra, y para cada uno de los tres genotipos, mas no así para las dosis de N. Los resultados de la predicción del rendimiento en la segunda fecha de siembra permiten indicar que la sobreestimación del rendimiento de tubérculo se debe a que no se consideró las pérdidas provocadas por las bajas temperaturas. Se requiere considerar en el modelo a qué nivel de temperatura se afectan variables tales como IAF, FRI, NTT, IC, MST y en consecuencia el rendimiento final.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Akeley, R.V., W.R. Mills, C.E. Cunningham, and J. Watts. 1968. Lenape: a new potato variety high in solids and chipping quality. *American Journal of Potato Research*. 45:142-145.
- Allen G.R., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirement). ISBN 92-5-104219-5. 290 pp.
- Allen, E.J., and R. K. Scott. 1980. An analysis of growth of the potato crop. *Journal of Agricultural Science*. (Cambridge) 94:583- 606.
- Andrade, F. H., S. A. Uhart, and I. M. Frugone. 1993. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: Shade versus plant density effects. *Crop Science*. 33: 482-485.
- Andrade, F. H., S. A. Uhart, G. G. Arguissain, and R. A. Ruiz. 1992. Radiation use efficiency of maize grown in a cool area. *Field Crops Research*. 28: 345-354.
- Andrade, F., A. Cirilo, S. Uhart, y M. Otegui. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Ed. La Barrosa. Buenos Aires, Argentina. 292 p.
- Andreu, M. A., y da Silva Pereira, A. 2007. Asociación entre el color de la peridermis de la papa con características de importancia industrial. *Agricultura Técnica*. 67: 72-77.

- Arkebauer, T. J., A. Weiss, T. R. Sinclair, and A. Blum. 1994. In defense of radiation use efficiency: A response to Demetriades-Shah *et al.* (1992). *Agricultural and Forest Meteorology*. 68:221–227.
- Badillo-Tovar V., J. Z. Castellanos-Ramos, J. de J. Muñoz-Ramos, P. Sánchez-García, S. Villalobos-Reyes, P. Vargas-Tapia. 2004. Demanda nutrimental del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, en la región del Bajío. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, Chapingo, México, 10 (1): 67-74.
- Belanger, G., J. R. Walsh, J. E. Richards, P. H. Milburn, and Ziadi N. 2002. Nitrogen fertilization and irrigation effects tuber characteristics of two potato cultivars. *American Journal of Potato Research*. 79:269-279.
- Benacchio, S. S. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.
- Bhatt, M., and S. V. Chanda. 2003. Prediction of leaf área in *Phaseolus vulgaris* by non-de-structive method. *Bulg. Journal of Plant Physiology*. 29:96-100.
- Biernand, H., and Vos J. 1992. Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant. 2. The partitioning of dry matter, nitrogen and nitrate, *Annals of Botany* 70 :37–45.

- Boedhram, N., T. J. Arkebauer, and W. D. Batchelor 2001. Season-long characterization of vertical distribution of leaf area in corn. *Agronomy Journal*. 93:1235-1242.
- Bollero, G. A., D.G. Bullock, and S. E. Hollinger. 1996. Soil temperature and planting date effects on corn yield, leaf area, and plant development. *Agronomy Journal*. 88: 385-390.
- Bonavia, D. 1993. La papa: Apuntes sobre sus orígenes y su domesticación. In: *Journal de la Société des Américanistes*. 79: 173-187
- Bonhomme, R. 2000. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. *Field Crops Research*. 68:247–252.
- Boote, K. J., J. W Jones, and G. Hoogenboom. 1988. Research and management application of the pnutgro crop growth model. *Proceedings of the American Peanut Research and Education Society*. pp. 20-57.
- Bouman, B. A. M., H. van Keulen, H. H. van Laar, R. Rabbinge. 1996. The 'School of the Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*. 52:171-198.
- Bowen, W., H. Cabrera, V. Barrera, G. Baigorria. 1999. Simulating the Response of Potato to Applied Nitrogen. In: *Cip Program Report 1997 – 1998*. International Potato Center, Lima, Peru, pp 381-386.
- Bowen, W., P. Thornton, y G. Hoogenboom. 1998. The simulation of cropping sequences using DSSAT, in Tsuji, G., G. Hoogenboom y P. Thornton

(eds): Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. pp. 313-327

Brandes, D., M. Maestri, C. Vieira, F. R. Gomes 1973. Efeitos da população de plantas e da época de plantío no crescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*). III. Intercepção de luz e eficiencia de conversao da energia solar. *Experientiae*, Viçosa, 15(1) : 1-21.

Brougham, R. W. 1960. The relationship between the critical leaf area, total chlorophyll content and maximum growth rate of some pasture and crop plants. *Annals of Botany*. 24:463-474.

Burstall, L., and P. M. Harris. 1983. The estimation of percentage light interception from leaf area index and percentage ground cover in potatoes. *Journal of Agricultural Science* 100: 241-244.

Campbell, G. S. 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*. 36:317-321.

Campbell G S, J M Norman (1989) The description and measurement of plant canopy structure. In: G. Russel, , B. Marshall, , P.G. Jarvis, (Eds), *Plant Canopies: Their Growth, Form and Function*. Cambridge University Press, Cambridge, pp.1-19.

Cao, W., and T. W. Tibbitts. 1995. Leaf emergence on potato stems in relation to thermal time. *Agronomy Journal*. 87:474-477.

- Carberry, P. S., R. C. Muchow, and R. L. McCown. 1989. Testing the CERES-Maize simulation model in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*. 20:297-315.
- Carranza, C., O. Lancho, D. Miranda, M. R. Salazar, y B. Chaves. 2008. Modelo simple de simulación de distribución de masa seca en brócoli (*Brassica sp.*) variedad Coronado y repollo (*Brassica oleracea*) híbrido Delus cultivados en la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana* 26(1): 23-31
- Casa, R., and H. G. Jones. (2003) Field-based multi-angular remote sensing for plant stress monitoring. In: Stafford J, Werner A (eds) *Precision Agriculture*. Wageningen, the Netherlands, pp 109–114
- Charles-Edwards, D. A. 1982. *Physiological determinants of crop growth*. Academic Press, North Ryde, NSW, Australia. 161 p.
- Charles-Edwards, D.A., D. Doley, and G.M. Rimmington. 1986. *Modelling plant growth and development*. Academic Press Australia. North Ryde, NSW, 235 pp.
- Cieslik, E. 1997. Effect of the levels of nitrates and nitrites on the nutritional and sensory quality of potato tubers. *Hygiene and Nutrition in Foodservice and Catering*. 1: 225-230.
- Cintra de Jesús, W., F. X. Ribeiro do Vale Jr, C. R. Resende, and C. L. Costa. 2001. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. *Agronomy Journal*. 93:989-991.

- Collins, W. B. 1977. Analysis of growth in Kennebec with emphasis on the relationship between stem number and yield. *American Potato Journal* 54:33-40.
- De La Casa, A., G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, I. Ibarra, y A. Rodríguez. 2008. El índice de área foliar en papa estimado a partir de la cobertura del follaje. *Agronomía Tropical*. 58(1): 61-64.
- De la Casa, A. C., G. G.Ovando, A. R. Rodríguez, L. Bressanini, A. Rodríguez, y J. Martínez. 2003. Uso del índice de área foliar y del porcentaje de cobertura del suelo para estimar la radiación interceptada en papa. *Agricultura Técnica (Chile)*. 67(1):78-85.
- Debouck, G. D., y R. Hidalgo. 1985. Morfología de la planta de frijol común. In: *Frijol, investigación y producción*. Compilado y editado por M. López, F. Fernández y A. Schoonhoven. CIAT. Cali, Colombia. pp. 7-42.
- Demetriades-Shaw, T. H., M. Fuchs, E. T. Kanemasu, and I. Flitcroft. 1992. A note of caution concerning the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. *Agricultural and Forest Meteorology*. 58:193-207.
- Demetriades-Shaw, T. H., M. Fuchs, E.T. Kanemasu, and I. Flitcroft. 1994. Further discussions on the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. *Agricultural and Forest Meteorology*. 68:231-242.

- Dirks, V. A., and E. F. Bolton. 1981. Climatic factors contributing to year-to-year variation in grain yield of corn on Brookston Clay. *Canadian Journal of Plant Science*. 61: 293-305.
- Donald, C. M., and Hamblin. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*. 28:361-405.
- Doorenbos J., y A. H. Kassam. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje No. 33. FAO. Roma. 212 p.
- Dyson, P. W., and D. J. Watson. 1971. An analysis of the effects of nutrient supply on the growth of potato crops. *Annals of Applied Biology*. 69:47-63.
- Elings, A. 2000. Estimation leaf area in tropical maize. *Agronomy Journal* 92: 436-444.
- Enoch, H. Z., and R. G. Hurd. 1979. The effect of elevated CO₂ concentration in the atmosphere on plant transpiration and water use efficiency: A study with potted carnation plants. *International Journal of Biomaterials*. 23: 343-351.
- Ephrath, J. E., J. D. Hesketh, and D. M. Ahm. 1994. Leaf and stem characteristics in maize strains differing in stem leaf number. *Photosynthetica* 30:381-388.

- Feddes, R. A., and R. W. R. Koopmans. 1995. *Agrohydrology*. Lecture notes, Wageningen Agricultural University, Department of Water Resources, Wageningen. 270 pp
- Firman, D. M., and E. J. Allen. 1989. Relationship between light interception, ground cover and leaf area index in potatoes. *Journal of Agricultural Science*. 113: 355–359.
- Fisher, K. J., P. R. Johnstone, and M. A. Nichols. 2002. Nutrition of processing tomatoes. *Acta Horticulturae* 571:45–49.
- Flénet, F., J. R. Kiniry, J. E. Board, M. E. Westgate, D. C. Reicosky. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Agonomy Journal*. 88: 185–190.
- Gallagher, J. N., and P. J. Biscoe. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *Journal of Agricultural Science*. (Cambridge) 91:47–60
- García, E. 1988. *Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. INEGI. México.
- Gardner, F. P., P. R. Brent, R. L. Mitchel. 1985. Carbon fixation by crop canopies. In: *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. Pp. 31-57.
- Gawronska, H., R. B. Dwelle, and Pavek. 1990. Partitioning of photoassimilates by potato plants (*Solanum tuberosum* L.) as influenced by irradiance. II. Partitioning patterns by four clones grown under high and low irradiance. *American Journal of Potato Research*. 67: 163-176

- Genova, B. L. J. 1983. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum* L) a niveles de humedad del suelo en dos etapas fenológicas y a la fertilización nitrogenada. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 198 p.
- Gijsman, A.J., and W. T. Bowen. 2001. Simulating crop production in low-input agricultural systems with DSSAT linked to the CENTURY soil-organic-matter module. In: Proceedings of the SAAD-III Third International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development, Lima, Perú, November 8-10, 1999. [CD-ROM computer file]. International Potato Center (CIP), Lima, Peru.
- Gijsman, A. J., G. Hoogenboom, W. J. Parton, P. C. Kerridge. 2002. Modifying DSSAT for low-input agricultural systems using a soil organic matter residue module from CENTURY. *Agronomy Journal* 94 (3), 462-474.
- Giletto, C. M., J. E. Rattin, H. E. Echeverria, y D. O. Caldiz. 2007. Eficiencia de uso del nitrógeno en variedades de papa para industria cultivadas en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo*. 25: 43-51.
- Giletto, C. M., H. E. Echeverria, y V. Sadras 2003. Fertilización nitrogenada de cultivares de papa (*Solanum tuberosum*) en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 21 (2):44-51.
- Gislason, J., H. K. Dahle, R. Baerug, L. Roer, and K. Ronsen. 1984. Nitrate in potatoes. 1. The effect of fertilization and storage on the nitrate content in 5 genotypes grown in widely separated localities. *Potato Research*. 27(3): 333-337

- Gmelig M. H. D., and K. B. A. Bodlaender. 1981. Varietal differences in growth, development and tuber production of potatoes. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 29(2):113, 127
- Goffart, J. P., M. Olivier, and M. Frankinet. 2008. Potato Crop Nitrogen Status Assessment to Improve N Fertilization Management and Efficiency: Past–Present–Future. *Potato Research*. 51: 355-383
- Godwin, D. C., and U. Singh. 1989. Nitrogen dynamics in IBSNAT crop models. *Agronomy Abstracts*, p. 15.
- Gordon, R., D. M. Brown, and M. A. Dixon. 1997. Estimating potato leaf area index for specific cultivars. *Potato Research*. 40:251-266.
- Gosse, G., C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, M. Chartier, J. M. Allirand, G. Lemaire. 1986. Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. *Agronomie* 6:47-56.
- Goudriaan, J., and H. H. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbok with exercises. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. The Netherlands. 238 pp.
- Gould, W. A. 1988. Quality of potatoes for chip manufacture. Potato quality industry needs for growth. Fort Collins, Colorado. The Potato Association of America. pp 10-20.

- Graf, B., O. Rakotobe, P. Zahner, V. Delucchi, y A. P. Gutierrez. 1990. A simulation model for the dynamics of rice growth and development: Part I -The carbon balance. *Agricultural Systems*. 32, 341-365.
- Griffin, T. S., B. S. Johnson, and J. T. Ritchie. 1993. A simulation model for potato growth and development: SUBSTOR-Potato Version 2.0. IBSNAT Research Report Series. pp. 02-29
- Hammer, G. L., and G. C. Wright. 1994. A theoretical analysis of nitrogen and radiation effects on radiation use efficiency in peanut. *Australian Journal of Agricultural Research*. 45: 575-589.
- Hashemi-Dezfouli, A., and S. J. Herbert. 1992. Intensifying plant density response of corn with artificial shade. *Agronomy Journal*. 84: 547-555.
- Haverkort, A. J., M. Boerma, R. Velema, and M. van de Waart. 1992. The influence of drought and cyst nematodes on potato growth. *Netherlands Journal of Plant Pathology*. 98, 179-191.
- Haverkort, A. J., 2007. Potato crop response to radiation and daylength *In: Potato Biology and Biotechnology: Advances and Perspectives*, D. Vreugdenhil, Ed., Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. pp. 353–365.
- Haverkort, A. J., and P. M. Harris. 1987. A model for potato growth and yield under tropical highland conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 39:271-282.

- Haverkort, A. J., and Bacamumpaka, M. 1986: Correlation between intercepted radiation and yield of potato crops infested by *Phytophthora infestans* in Central Africa. *Netherland Journal of Plant Pathology* 92: 239–247.
- Hinojosa, C. G. A. 1979. FENOLOGÍA. Boletín Técnico No.3. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 61 pp.
- Hodges, T., B. Johnson, and L. Manrique. 1989. SUBSTOR: A model of potato growth and development. *Agronomy Abstracts*, 16. Madison, Wisconsin American Society of Agronomy.
- Horton, D. 1987. Potatoes. Production marketing and programs for developing countries. Westview Press Inc. Winrock Development Oriented literature Series. USA. 243 p.
- Horton, D., and R. L. Sawyer. 1985. The potato as a food crop, with special reference to developing areas. *In: Potato physiology*. H. P. Li (ed). Academic Press. USA. 585 p.
- Huett, D. O., and E. B. Dettmann. 1991. Nitrogen Response Surface Models of Zucchini Squash, Head Lettuce and Potato. I. Effect of N on Growth, dry Matter Partitioning and on Fresh Yield and Quality. *Plant and Soil* 134 (2): 243-254.
- Hunt, R. 1982. *Plant Growth Curves. The functional approach to plant growth analysis*. Edward Arnold. London. 248 p.
- Hunt, R. 1978. *Plant Growth Analysis. The Instit. Of Biol. Studies in Biology No. 96*. Edward Arnold. London. 67 p.

- IBSNAT. 1990. IBSNAT Technical Report 5, Documentation for IBSNAT Crop Model Input and Output Files, Version 1.1. IBSNAT Project, Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii, Honolulu, HA.
- IBSNAT. 1991. IBSNAT Technical Report 4, Documentation for the IBSNAT Data Base Management System for the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT v.2.1). IBSNAT Project, Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii, Honolulu, HA.
- Ingram, K. T., and D. E. McCloud. 1984. Simulation of potato growth and development. *Crop Science*. 24:21-27
- Inoue, H., and A. Tanaka. 1978. Comparison of source and sink potentials between wild and cultivated potatoes. *Journal of Soil Science*. 49: 321-327.
- Iritani, W. M., and L. D. Weller. 1980. Sugar development in potatoes. Extension Bulletin 0717. Cooperative Extension – College of Agriculture. Washington State University. Pullman, WA. 16p.
- Jackson, S. D. 1999. Multiple signaling pathways control tuber induction in potato. *Plant Physiology* 119:1-8.
- Jamieson, P. D., R. J. Martin, G. S. Martin, and D. R. Wilson. 1995. Drought effects on biomass production and radiation-use efficiency in barley. *Field Crops Research*. 43:77–86.

- Jefferies, R. A., and D. K. L. MacKerron. 1993. Responses of potato genotypes to drought. II. Leaf area index, growth and yield. *Annals of Applied Biology*. 122:105-112.
- Jefferies, R. A., and D. K. L. MacKerron. 1989. Radiation interception and growth of irrigated and droughted potato (*Solanum tuberosum* L.). *Field Crops Research*. 22:101-112.
- Jefferies, R. A., and T. D. Heilbronn. 1991. Water stress as a constraint on growth in the potato crop. 1. Model development. *Agricultural and Forest Meteorology*. 53:185-196.
- Jeffers, D. L., and R. M. Shibles. 1969. Some effects of leaf area, solar radiation, air temperature and variety on net photosynthesis in field grown soybeans. *Crop Science*. 9:762-764.
- Jenkins, P. D., and Mahmood S. 2003. Dry matter production partitioning in potato plants subjected to combined deficiencies of nitrogen, phosphorus and potassium *Annals of Applied Biology* 143:251-229.
- Jenkins, P. D., and D. G. Nelson. 1992. Aspects of nitrogen fertilizer rate on tuber dry-matter content of potato cv. Record. *Potato Research*. 35(2): 127-132.
- Jones, C. A., and J. R. Kiniry. 1986. CERES-Maize: a simulation model of Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, 194 pp.

- Karlen, D. L., and C. R. Camp. 1985. Row spacing, plant population and water management effects on corn in the Atlantic Coastal Plain. *Agronomy Journal*. 77: 711-715.
- Karvonen, T., and J. Kleemola. 1995. Modelling and parameterization of the soil plant atmosphere system: a comparison of potato growth models: 335-369 pp
- Khurana, S. C., and J. S. McLaren. 1982: The influence of leaf area, light interception and season on potato growth and yield. *Potato Research* 25: 329-342.
- Kiniry, J. R., C. A. Jones, J. C. O'Toole, R. Blanchet, M. Cabelguenne, and D. A. Spanel. 1989. Radiation use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five grain-crop species. *Field Crops Research* 20: 51-64.
- Kiniry, J. R., C. E. Simpson, A. M. Schubert, and J. D. Reed. 2005. Peanut leaf area index, light interception, radiation use efficiency, and harvest index at three sites in Texas. *Field Crops Research* 91:297–306
- Kiniry, J. R., C. R. Tischler, G. A. Van Esbroeck. 1999. Radiation use efficiency and CO₂ exchange for diverse C₄ grasses. *Biomass and Bioenergy* 17:95–112.
- Kleinkopf, G. E., D. T. Westermann, and R. B. Dwelle. 1981. Dry matter production and nitrogen utilization by six potato cultivars. *Agronomy Journal*. 73: 799-802.

- Kooman, P. L. 1995. Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and day length. Thesis, Landbouw Universiteit Wageningen, Wageningen, The Netherlands. 155 p.
- Kooman, P. L., M. Fahem, P. Tegera, and A.J. Haverkort. 1996. Effect of climate on different potato genotypes: 1. Radiation interception, total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy*. 5:193-205.
- Korva, J. T., and G. A. Forbes. 1997. A simple and low-cost method for leaf area measurement of detached leaves. *Experimental Agriculture*. 33:65-72.
- Krauss, A. 1985. Influence of nitrogen nutrition on tuber initiation of potatoes. In: *Physiological Aspects of Crop Productivity. Proceedings of the 15th Colloquium of the International Potash Institute, Switzerland*. pp: 175-184.
- Lal, K. N., and R. M. S. Subba. 1951. A rapid method of leaf area determination. *Nature* 167: 72.
- Lara, R. V. 1993. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum* L.) a la variación del régimen de humedad en el suelo, en tres etapas fenológicas del cultivo y aspectos fisiotécnicos. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 132 p.
- Lauer, D. A. 1986. Response of Nooksack potatoes to nitrogen fertilizer. *American Journal of Potato Research*. 63: 251-262.

- Leith, J. H. J. P. Reynolds, and H. H. Rogers. 1986. Estimation of leaf area of soybeans Brown under elevated carbon dioxide levels. *Field Crops Research*. 13: 193–203.
- Liegel, E. A., and L. M. Walsh. 1976. Evaluation of sulfur coated urea (SCU) applied to irrigated potatoes and corn. *Agronomy Journal*. 68:457–463.
- Lucchesi, A. A. 1987. Fatores da produção vegetal. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. (Ed.). *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. pp:1-2.
- MacCollum, R. E. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes. II. Time by P-status interactions for growth and leaf efficiency. *Agronomy Journal* 70:58-67.
- Mackerron, D. K. L., M. W. Young, and H. V. Davies 1995. A critical assessment of the value of petiole sap analysis in optimizing the nitrogen nutrition of the potato crop. *Plant and Soil* 172: 247-260.
- Mackerron, D. K. L., and P. D. Waister. 1985. A simple model of potato growth and yield. Part I. Model development and sensitivity analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*. 34:241-252.
- Manrique L. A. 1993. Constraints for potato production in the tropics. *Journal of Plant Nutrition* 16:2075-2120.

- Manrique, L. A., J. R. Kiniry, T. Hodges, and D. S. Axness. 1991. Dry matter production and radiation interception of potato. *Crop Science* 31: 1044-1049.
- Mccollum, R. E. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes. II. Time by P-status interaction for growth and leaf efficiency. *Agronomy Journal*. 70: 58-67.
- McCree, K. J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against actual leaf photosynthesis data. *Agricultural meteorology*. 10 : 443-453.
- McCullough, D. E., Ph. Girardin, M. Mihajlovic, A. Aguilera and M. Tollenaar. 1994. Influence of N supply on development and dry matter accumulation of an old and new maize hybrid. *Canadian Journal of Plant Science*. 74:471-477.
- McKee, G. W. 1964. A coefficient for computing leaf area in hybrid corn. *Agronomy Journal* 56: 240-241.
- Mendoza, R. J. L. 1998. Nutrición del cultivo de la papa en el norte de Sinaloa. Folleto CEVAF-INIFAP 13:1-16.
- Midmore, D.J. and Prange, R. K. (1992). Growth response of two *Solanum spp.* to contrasting temperatures and irradiance levels: Relations to photosynthesis, respiration and chlorophyll fluorescence. *of Botany*. 69:3-20.

- Millard P., and Marshall B., 1986. Growth, nitrogen uptake and partitioning within the potato (*Solanum tuberosum* L.) crop, in relation to nitrogen application. *Journal of Agricultural Science. Camb.* 107: 421-429.
- Mitchell, R. L. 1970. *Crop Growth and Culture*. Iowa State University Press, Ames, 349 p.
- Mohammad, M. J., S. Zuraiqi, W. Quasmeh, and I. Papadopoulos. 1999. Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip-irrigated potato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 54: 243-249.
- Monsi, M., and T. Saeki. 1953. Über der lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japan. Journal Botany*. 14:22-52.
- Monsi, M., and T. Saeki. 2005. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Annals of Botany*. 95, 549–567.
- Monteith, J. L. 1994. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology* 68: 213-220.
- Monteith, J. L. 1969. Light interception and radiative exchange in crop stands. In: J.D. Easton, F.A. Haskins, C.Y. Sullivan and C.H.M. van Bavel (eds), *Physiological aspects of crop yield*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. pp. 89-111
- Monteith, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Proceedings of the Royal Society of London. Series B.* 281:277-294.

- Montgomery, E. G. 1911. Correlation studies of com. Nebraska Agricultural Station Annual Report, Lincoln, 24:108-159.
- Moorby, J., and F. L. Mithorpe. 1983. Papa. *In*: Fisiología de los cultivos. L T Evans (eds). Traducido por Héctor González Idiarte. 1a ed. Edit. Hemisferio Sur. S. A. Buenos Aires Argentina. pp: 245-280.
- Mora, A. R. 1998. Dinámica del crecimiento y productividad de *Solanum tuberosum* L. en condiciones de temporal. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 165 p.
- Muchow, R. C. and R. Davis. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semiarid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Research*. 18:17-30.
- Nishibe, S. M., M. M. Satoh, A. Isoda, K. Nakaseko. 1989. Effect of climatic conditions on intercepted radiation and some growth parameters in potato. *Japanese Journal of Crop Science* 58: 171-179, cited by L. A. Manrique; Kiniry, J. R.; Hodges, T.; Axness, D. S. 1991: Dry matter production and radiation interception of potato. *Crop Science* 31: 1044-1049.
- Nobel, P. S., I. N. Forseth, and S. P. Long. 1993. Canopy structure and light interception. *In*: Photosynthesis and Production in a Changing Environment. Hall DO, Scurlock JMO, Bolhar-Nordenkampf HR, Leegood RC, Long S. P. (eds), Chapman and Hall, London, England. pp. 79-90.

- Novoa, R., and R.S. Loomis. 1981. Nitrogen and plant production. In: J. Monteith and C. Webb (eds). Soil water and nitrogen in Mediterranean-type environments, Martinus- Nijhoff/Dr. W. Junk, The Hague. pp :177-204.
- Ñústez, C. E., M. Santos, y M. Segura. 2009. Acumulación y distribución de materia seca de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Zipaquirá, Cundinamarca, Colombia. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 62(1):4823 - 4834.
- Ojala, J. C., J. C. Stark, and G. E. Kleinkopf. 1990. Influence of irrigation and nitrogen management on potato yield and quality. American Potato Journal. 67:29-43.
- Padilla, R. J. S., D. E. Acosta, B. R. Gaytán y M. V. M. Rodríguez. 2005. Índice de área foliar en frijol de temporal y su relación con biomasa y rendimiento. Agricultura Técnica México. 31 (2):213-219.
- Pashiardis, S. M. 1987. Improvement of Potato Yields. In: Agrometeorology of the Potato Crop. Acta Horticulturae 214: 27-44.
- Pavlista, A. D. and J. C. Ojala. 1997. Potatoes: Chip and French Fry Processing. In Processing Vegetables: Science and Technology, Ed. Smith, Cash, Nip & Hui. Technomics Publ. Co. Inc., Lancaster, PA. Chapter 10, pp. 237-284
- Penning de Vries, F. W. T., and R. Rabbinge. 1995. Models in research and education, planning and practice. Haverkort, A., D. MacKerron (eds): In

Ecology and modelling of Potato crops under conditions limiting growth.
Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. Pp. 1-18

Penning de Vries, F. W. T., D.M. Jansen, H. F. M. ten Berge, and A. Bakema. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Pudoc Wageningen. 271 pp.

Pérez, J., E. García, J. Enríquez, A. Quero, J. Pérez y A. Garay. 2004. Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto 'mulato' (*Brachiaria híbrido*, cv.). Técnica Pecuaria México. 42(3), 447-458.

Porter, G. A. and J. A. Sisson. 1993. Yield market quality and petiole nitrate concentration of non-irrigated Russet Burbank and Shepody potatoes in response to side dressed nitrogen. American Journal of Potato Research. 70: 101-116.

Prince, S. D. 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. International Journal of Remote Sensing 12: 1313-1330.

Pritchard, M. K., and M. G. Scanlon. 1997. Mapping dry matter and sugars in potato tubers for prediction of whole tuber process quality. Canadian Journal of Plant Science 77: 461-467.

Rasband, W. 2007. ImageJ: Image processing and analysis in Java. Version 1.38x. Disponible en: <http://rsb.info.nih.gov/ij>. (Revisado 10 de Noviembre de 2007)

- Raymond, E. E., Jongschaap, and R. Booij. 2004. Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5:205–218
- Reta, S. D. G. 1986. Crecimiento y aprovechamiento de la energía solar del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en asociación con maíz (*Zea mays* L.). Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Botánica. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 206 p.
- Reynolds, M. P., and E. E. Ewing. 1989. Effects of high air and soil temperature stress on growth and tuberization in *Solanum tuberosum*. *Annals of Botany*. 64(3):241-247.
- Ritchie, J. T., and S. Otter. 1985. Description and performance of Ceres-wheat: a user-oriented wheat yield model. US Department of Agriculture. ARS, 38:159-175.
- Ritchie, J. T., Godwin D. C., and U. Singh. 1989. Soil and weather inputs for the IBSNAT models. *Agronomy Abstracts* p. 21.
- Ritchie, J. T., U. Singh, D. C. Godwin, and L. Hunt 1991. A users guide to CERES-Maize - version 2.10. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL.
- Ritchie, J., T. Griffin, and B. Johnson. 1995. SUBSTOR: functional model of potato growth, development and yield. Pp. 401-435, in Kabat, P. *et al.* (eds.): *Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system*. Wageningen.

- Rocha, R. R., Quijano C. A., and Paredes M. R., 2000. MSPECPAPA, A Simulation Model to Assess Damage in Potato. The Potato Association of America. 77:416
- Rousselle, P., Y. Robert, J. C. Crosnier. 1996. La pomme de terre. Institut National de la Recherche Agronomique. París, Francia. pp. 25-154.
- Rowe, R. C. 1993. Managing potato health from emergence to harvest. In: Potato Health Management. R C Rowe (edit). APS Press. Saint Paul, Minn. pp : 35-40.
- Ruimy, A., P. G. Jarvis, D. D. Baldocchi, B Saugier. 1995. CO2 Fluxes over plant canopies and solar radiation: a review. Advances in Ecological Research 26:1-68.
- Sale, P. J. M. 1973. Productivity of vegetable crops in a region of high solar input. I. Growth and development of the potato (*Solanum tuberosum* L.). Australian Journal of Agricultural Research. 24: 733-749
- Salisbury, F. B., C. W. Ross. 1994. Fisiología Vegetal. Traducción al español de V. González. Grupo Editorial Iberoamérica. S.A. de C. V. México. D. F. 759 p.
- Saluzzo, A., H. Echeverría, F. H. Andrade, and M. Huarte. 1999. Nitrogen nutrition of potato cultivars differing in maturity. Journal of Agronomy and Crop Science.183:157 – 165.

- Saluzzo, A., H. Echeverria, F. Andrade, and M. Huarte. 1999. Nitrogen nutrition of potato cultivars differing in maturity. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 183:157-165.
- Sanderson, J. B., and R. P. White. 1987. Comparison of urea and ammonium nitrate as nitrogen sources for potatoes. *American Journal of Potato Research*. 64:165–176.
- Santibáñez, F. 1994. Crop requirements: Temperate crops. In: *Handbook of agricultural meteorology*. J. F. Griffiths Editor. Oxford Univ. Press. New York., USA. pp. 174-188.
- SAS Institute Inc. 2002. *SAS/STAT User's Guide, Version 9.0*. SAS Institute Inc., Cary NC.
- Schmidt, J. P., A. J. DeJoia, R. B. Ferguson, R. K. Taylor, R. K. Young, and J. L. Havlin. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen at Multiple In-Field Locations. *Agronomy Journal*. 94:798-806.
- Scott, D., P. H. Menalda, and R. W. Brougham. 1968. Spectral analysis of radiation transmitted and reflected by different vegetables. *New Zealand Journal of Botany*. 6: 427-449.
- Scott, R. K., S. J. Willockson. 1982. Application of physiological and agronomic principles to the development of the potato industry. *In: The Potato Crop: The Scientific Basis for Improvement*. P.M. Harris (ed). J. Wiley, New York. pp: 11-42.

- Scott, R. K., and S.J. Wilcockson. 1978, Application of physiological and agronomic principles to the development of the potato industry In: P.M. Harris (ed.), The potato crop; the scientific basis for improvement. Chapman and Hall, London. pp. 678-704.
- Scott, G., M. Rosegrant, y C. Ringler. 2000. Raíces y tubérculos para el siglo 21; tendencias, proyecciones y opciones políticas. Washington. D.C. International Food Policy Research Institute. 2p.
- Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2008. Panorama Mundial de la papa [En línea]. Disponible en <http://www.siea.sagarpa.gob.mx> (Revisado el 10 de junio del 2008).
- Shah, S. F. A. B. A. McKenzie, R. E. Gaunt, J. W. Marshall, and C. M. Frampton. 2004. Effect of early blight on healthy area duration and healthy area absorption of potatoes (*Solanum tuberosum*) grown in Canterbury, New Zealand with different nitrogen application and stress from potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis*). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 32: 85–102.
- Shaw, R. H., 1988. Climate requirement. In: Corn and Corn Improvement. G F Sprague, J W Dudley (eds). *Agronomy, Monograph Series No.18*, 3rd edition. Madison, Wisconsin, U.S.A. pp: 609-638.
- Shibles, R. M. and Weber C. R. 1965. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybean. *Crop Science* 5:575-577.
- Sibma, L. 1977. Maximization of arable crop yields in the Netherland. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 25: 278-287.

- Sinclair, T. R., and Horie T. 1989. Leaf nitrógeno, photosynthesis, and crop radiation use efficiency. A review. *Crop Science*. 29: 90-98.
- Sinclair, T.R., and R. C. Muchow. 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy* 65: 215–265.
- Slater, J. W. 1968. The effect of night temperature on tuber initiation of the potato. *European Journal* 11:14-22.
- Snyder, R. L. 1985. Hand calculating degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*. 35: 353-358.
- Soboh, G. A., R. Sully, and H. Hopkins. 2000. Ways to increase tuber number. In: *Australian Potato Research, Development and Technology Transfer Conference*, Adelaide, Australia. Agosto 2000.
- Sowokinos, J. R., and D. A. Preston. 1988. Maintenance of potato processing quality by chemical maturity monitoring (CMM). Minnesota Agricultural Experiment Station. St. Paul, MN. Bulletin 586: 1-11.
- Spitters, C. J. T. 1987. An analysis of variation in yield among potato cultivars in terms of light absorption, light utilization and dry matter partitioning. *Acta Hortie*. 14, 71-84.
- Spitters, C. J. T., H. van Keulen, D. W. G. van Kraalingen. 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87 *In: Simulation and systems management in crop protection* R. Rabbinge, S.A. Ward and H. H. van Laar (Editors), PUDOC Wageningen, pp 147-181.

- Stark, J. C., I. R. McCann, D. T. Westermann, B. Izadi, and T. A. Tindall. 1993. Potato response to split nitrogen timing with varying amounts of excessive irrigation. *American Journal of Potato Research*. 70:765–777.
- Steer, B.T., S. P. Milroy, y R. M. Kamona. 1993. A model to simulate the development, growth and yield of irrigated sunflower. *Field Crops Research*. 32, 83-99.
- Stuttle, G.W., N. C. Yorio, R. M. Wheeler. 1996. Interacting effects of photoperiod and photosynthetic photon flux on net carbon assimilation and starch accumulation in potato leaves. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, v.121, p. 264-268.
- Supit, I., A. A. Hooijer, and C. A. van Diepen. 1994. System description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model implemented in CGMS. Volume 1: Theory and Algorithms. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 146 pp.
- Karvonen, T., and J. Kleemola, 1995. "CROPWATN: Prediction of water and nitrogen limited crop production. Modelling and Parameterization of the Soil-Plant-Atmosphere System: A Comparison of Potato Growth Models (Eds. Kabat, P., Marshall, B., van den Broek, B.J., Vos, J. and van Keulen, H.)", Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands, 335-369.
- Talley, E. A. 1983. Protein nutritive value of potatoes is improved by fertilization with nitrogen. *American Journal of Potato Research*. 60: 35-39.

- Tewolde, H., K. R. Sistani, and D. E. Rowe, A. Adeli, T. Tsegaye. 2005. Cotton leaf area index estimation non destructively with a light sensor. *Agronomy Journal*. 97:1158–1163.
- Thornley, J. H. M., and I. R. Johnson. 2000. *Plant and crop modeling. A mathematical approach to plant and crop physiology*, The Blackburn Press, 669 pp.
- Tsuji, G., G. Uehara y S. Balas (eds). 1994. *DSSAT. Versión 3*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- van Delden A., A. Pecio, A. J. Haverkort. 2000. Temperature response of early foliar expansion of potato and wheat. *Annals of Botany*. 86: 355–369.
- van Delden, A., 2001. Yield and Growth Components of Potato and Wheat under Organic Nitrogen Management . *Agronomy Journal* 93:1370-1385
- van den Brock B. J., 1992. Predicting Times of Irrigation with a Simulation Model, M.Sc. Thesis, University of Alberta, Canada.
- van der Zaag, D. E. 1984. Relability and significance of a simple method of estimating the potential yield of the potato crop. *Potato Research* 27:51-73
- van der Zaag, D. E. 1985. Some useful calculations regarding the potato crop. *International Potato Course*. I. A. C.. Wageningen 43 p.
- van Genuchten M. T. H., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 32:607-615.

- van Heemst, H. D. J. and Van Keulen, H. 1986. Potential crop production In: Van Keulen, H. and Wolf, J. (eds.), modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Pudoc, Wageningen; The Netherlands.
- van Ittersum, M. K., Leffelaar P.A., van Keulen H.; Kropff M.J.; Bastiaans L.; Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234.
- van Keulen H., 1975. Simulation of Water Use and Herbage Growth in Arid Regions. PUDOC, Wageningen, The Netherlands,
- van Keulen H., Penning de Vries, F.W.T. and Drees, E.M., 1982. A summary model for crop growth. En F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar (Eds.) Simulation of plant growth and crop production. Simulation monographs. Wageningen.
- van Laar H.H., Goudriaan J., van Keulen H., 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. AB-DLO. Wageningen. The Netherlands. 79 pp.
- van Oijen, M. 1991: Light use efficiency of potato cultivars with late blight (*Phytophthora infestans*). *Potato Research* 34: 123–132.
- Vavilov. 1951. The Origin, Variation, Immunity & Breeding of Cultivated Plants. *Chronica Botanica* 13:1–366.
- Vos, J., and J. Groenwold. 1989. Characteristics of photosynthesis and conductance of potato canopies and the effect of cultivar and transient drought. *Field Crops Research*. 20:237–250

- Vos, J., and H. Biemond. 1992. Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant. I. Leaf appearance, expansion growth, life spans of leaves and stem branching. *Annals of Botany* 70:27-35.
- Vos, J. 1995. The effects of nitrogen supply and stem density on leaf attributes and stem branching in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Potato Research* 38: 271–279
- Vos, J., and J. Groenwold. 1986. Root growth of potato crop* on a marine clay soil. *Plant and Soil* 94:17-33.
- Waterer D. 1997. Influence of irrigation, nitrogen and seed piece spacing on yields and tuber size distribution of seed potatoes. *Canadian Journal of Plant Science* 141-148.
- Watson D. J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variation in the net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany N. S.* 11:41-76.
- Weir, A. H., P. L. Bragg, J. R. Porter, and J. H. Rayner. 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limits. *Journal of Agricultural Science.* 102, 371-382.
- Wells, R. 1991. Soybean growth response to plant density: Relationships among canopy photosynthesis, leaf area and Light interception. *Crop Science.* 31: 755-761.

- Wheeler, R.M., T. W. Tibbitts, and A. H. Fitzpatrick 1989. Potato growth in response to relative humidity. *Hort Science* 24: 482-484.
- Wilhelm, W. W. F. Ruwe, and M. R. Schlemer. 2000. Comparison of three leaf area index meters in corn canopy. *Crop Science*. 40:1179-1183.
- Williams J.R., Jones C.A., Kiniry J.R., Spanel D., 1989. The Epic crop growth model. *Transactions of ASAE* 32(2): 497-511.
- Williams W. A., R. S. Loomis, and C. R. Lepley. 1965. Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity in relation to interception of solar radiation. *Crop Science*. 5: 211-215.
- Wilson, D.R., R.C. Muchow, and C. J. Murgatroyd. 1995. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in cool climate. *Field Crops Research*. 43: 1-18.
- Wolf, S., A. Marani, and J. Rudich. 1990. Effect of temperature and photoperiod on assimilate partitioning in potato plants. *Annals of Botany*. 66: 513-520.
- Wroniak J., W. Mazurczyk, A. Wierzbicka. 2006. Modifications of potato specific leaf area (SLA) by environmental conditions. - *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 509, 323-331