

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



**TESIS DE GRADO**

**DINÁMICA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE LA  
QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) CON RELACIÓN A SU  
EXPANSIÓN FOLIAR**

**YOLA MAMANI OCHOA**

La Paz, Bolivia  
2006

**Universidad Mayor de San Andrés**  
**Facultad de Agronomía**  
**Carrera de Ingeniería Agronómica**

**DINÁMICA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE LA QUINUA**  
**(*Chenopodium quinoa* Willd.) CON RELACIÓN A SU**  
**EXPANSIÓN FOLIAR**

*Tesis de Grado para optar el Título de*  
*Ingeniero Agrónomo*

*YOLA MAMANI OCHOA*

**Tutor:**

Dr. Nicolas Germain .....

**Asesor:**

Ing. M.Sc. Hugo Bosque Sánchez .....

**Comité Revisor:**

Ing. Ph D. Alejandro Bonifacio Flores .....

Ing. M.Sc. Carmen del Castillo Gutierrez .....

Ing. M.Sc, Félix Mamani Reynoso .....

**APROBADA**

**Decano:**

Ing. M.Sc. Jorge Pascuali Cabrera .....

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos específicos .....	2
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1. Origen de la quinua .....	3
2.2. Descripción de la planta .....	3
2.3. Características del cultivo .....	4
2.3.1. Características fisiológicas .....	4
2.3.2. Características fenológicas .....	5
2.3.3. Descripción de variedades utilizadas en el ensayo .....	5
2.3.4. Rendimiento y superficie cultivada .....	6
2.4. Requerimientos del cultivo .....	7
2.4.1. Clima .....	7
2.4.2. Precipitación y temperatura .....	7
2.4.3. Fertilización .....	8
2.4.4. Suelos .....	8
2.5. Factores adversos del cultivo .....	9
2.6. Nutrición mineral .....	9
2.7. Función fisiológica del nitrógeno .....	10
2.8. Desarrollo y crecimiento .....	10
2.8.1. Producción primaria en crecimiento .....	10
2.8.2. Desarrollo, factores que afectan el desarrollo .....	11
2.8.2.1. Temperatura .....	11
2.8.2.2. Fotoperiodo .....	12
2.8.3. Crecimiento, factores que afectan el crecimiento .....	12
2.8.3.1. Temperatura como factor de crecimiento .....	13
2.8.3.2. Radiación solar .....	14
2.8.3.3. Disponibilidad de agua .....	15
2.8.3.4. Disponibilidad de nutrientes .....	15
2.8.4. El sistema asimilatorio .....	15
2.8.4.1. Duración del área foliar .....	15
2.8.4.2. Peso específico foliar .....	16
2.8.4.3. Índice de área foliar .....	16
2.8.4.4. Posición de las hojas e intercepción de la luz .....	17
2.9. Análisis de crecimiento .....	18
2.9.1. Evaluación del crecimiento .....	18
2.9.1.1. Medición de biomasa vegetal .....	18
2.9.1.2. Medición del área foliar .....	18
2.9.1.3. Diseño del muestreo .....	19
2.9.1.4. Cosecha, clasificación y secado de muestras .....	19
2.9.2. Análisis funcional del crecimiento .....	19
2.9.2.1. Curva de crecimiento sigmoideal .....	20

2.10. Restricción .....	22
2.11. Producción potencial .....	22
2.11.1. Definición .....	22
2.11.2. Niveles de producción .....	23
2.12. Modelos de simulación .....	24
2.12.1. Definición .....	24
2.12.2. Aplicación de los modelos de simulation .....	24
2.12.3. Limitaciones de los modelos de simulation .....	25
2.12.4. Tipos de modelos .....	25
2.12.4.1. Modelos descriptivos .....	25
2.12.4.2. Modelos dinámicos .....	25
2.12.4.3. Modelos explicativos .....	26
2.12.5. Clasificación de los modelos explicativos según su nivel de complejidad .....	26
2.12.6. Organización general de un modelo .....	26
2.12.7. Modelo WOFOST .....	27
2.12.8. Estructura del modelo WOFOST .....	28
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1. Características de la zona .....	30
3.1.1. Localización .....	30
3.1.2. Características Edafoclimáticas .....	30
3.1.2.1. Fisiografía .....	30
3.1.2.2. Clima .....	30
3.1.2.3. Suelo .....	31
3.1.2.4. Vegetación .....	31
3.2. MATERIALES .....	31
3.2.1. Materiales y equipos de campo .....	31
3.2.2. Materiales de laboratorio .....	32
3.2.3. Material químico .....	32
3.2.4. Material de gabinete .....	32
3.2.5. Material biológico .....	32
3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	32
3.3.1. Preparación del terreno y distribución de parcelas experimentales .....	32
3.3.2. Distribución de tratamientos, diseño experimental .....	33
3.3.3. Labores culturales .....	33
3.3.3.1. Fertilización química .....	33
3.3.3.2. Siembra .....	33
3.3.3.3. Aporques y desmalezados .....	34
3.3.3.4. Tratamientos fitosanitarios .....	34
3.3.3.5. Cosecha .....	34
3.3.4. Evaluación y toma de datos .....	35
3.3.4.1. Mapeo de vigor de las plantas .....	35
3.3.4.2. Planificación de muestreos .....	35
3.3.5. Evaluaciones destructivas .....	35
3.3.5.1. Número de plantas del segmento .....	35
3.3.5.2. Altura de la planta .....	35
3.3.5.3. Biomasa materia seca aérea .....	36
3.3.6. Variables de respuesta .....	36
3.3.6.1. Volumen .....	36

3.3.6.2. Materia seca total por órgano y por metro cuadrado .....	37
3.3.6.3. Área foliar (afol) y peso foliar por submuestra (fols) .....	37
3.3.6.4. Peso específico foliar (PEF) .....	38
3.3.6.5. Índice de área foliar (IAF) .....	38
3.3.6.6. Peso de grano (GRA) .....	39
3.3.6.7. Índice de Cosecha (IC) .....	39
3.3.7. Procedimiento estadístico .....	39
3.3.7.1. Ajuste de la evolución por medio de polinomios de orden primero, segundo o tercero .....	39
3.3.7.2. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar (MSA/IAF) .....	40
3.3.7.3. Comparación de la relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar (MSA/IAF) observado, con los resultados obtenidos mediante simulación .....	41
3.3.8. Simulaciones con el modelo estándar WOFOST para la relación del crecimiento con el IAF .....	42
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1. Desarrollo de la campaña agrícola .....	45
4.1.1. Condiciones climáticas .....	45
4.1.1.1. Temperatura .....	45
4.1.1.2. Precipitación .....	46
4.1.1.3. Radiación global .....	47
4.1.1.4. Análisis de suelo .....	47
4.2. Condiciones del cultivo .....	48
4.2.1. Siembra y emergencia .....	48
4.2.2. Factores adversos .....	49
4.2.3. Fisionomía del cultivo a los 65 dds .....	49
4.3. Observaciones en Blanca de Yanamuyu, tratamiento T1 .....	50
4.3.1. Variaciones en los muestreos del índice de área foliar .....	50
4.3.2. Variaciones en los muestreos del crecimiento aéreo .....	51
4.3.3. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar .....	52
4.3.4. Relación entre la materia seca aérea y el volumen .....	53
4.3.5. Evolución del peso específico foliar .....	54
4.3.6. Evolución de la relación entre hoja y tallo .....	55
4.3.7. Evolución de la relación entre inflorescencia y materia seca aérea .....	56
4.3.8. Índice de cosecha .....	57
4.4. Observaciones en Surumi, tratamiento T2 .....	57
4.4.1. Variaciones en los muestreos del índice de área foliar .....	57
4.4.2. Variaciones en los muestreos del crecimiento aéreo .....	58
4.4.3. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar .....	59
4.4.4. Relación entre la materia seca aérea y el volumen .....	60
4.4.5. Evolución del peso específico foliar .....	61
4.4.6. Evolución de la relación entre hoja y tallo .....	62
4.4.7. Evolución de la relación entre inflorescencia y materia seca aérea .....	63
4.4.8. Índice de cosecha .....	64
4.5. Observaciones en Surumi bajo fertilización, tratamiento T3 .....	65
4.5.1. Variaciones en los muestreos del índice de área foliar .....	65
4.5.2. Variaciones en los muestreos del crecimiento aéreo .....	65
4.5.3. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar .....	66

4.5.4. Relación entre la materia seca aérea y el volumen .....	67
4.5.5. Evolución del peso específico foliar .....	68
4.5.6. Evolución de la relación entre hoja y tallo .....	69
4.5.7. Evolución de la relación entre inflorescencia y materia seca aérea .....	70
4.5.8. Índice de cosecha .....	71
4.6. Observaciones en Forrajera bajo fertilización, tratamiento T4 .....	71
4.6.1. Variaciones en los muestreos del índice de área foliar .....	71
4.6.2. Variaciones en los muestreos del crecimiento aéreo .....	72
4.6.3. Relación entre la materia seca y el índice de área foliar .....	73
4.6.4. Relación entre la materia seca aérea y el volumen .....	74
4.6.5. Evolución del peso específico foliar .....	75
4.6.6. Evolución de la relación entre hoja y tallo .....	76
4.6.7. Evolución de la relación entre inflorescencia y materia seca aérea .....	77
4.6.8. Índice de cosecha .....	78
<b>5. DISCUSION .....</b>	<b>45</b>
5.1. Comparación entre tratamientos .....	79
5.1.1. Comparación de la relación entre la materia seca aérea .....	
y el índice de área foliar a los 73 dds .....	79
5.1.2. Comparación de la relación entre la materia seca aérea .....	
y el índice de área foliar a los 90 dds .....	80
5.1.3. Comparación de la relación entre la materia seca aérea .....	
y el índice de área foliar a los 111 dds .....	82
5.1.4. Comparación de la relación entre la materia seca aérea .....	
y el índice de área foliar a los 135 dds .....	84
5.2. Relación de la materia seca aérea y volumen .....	86
5.3. Comparación del peso específico foliar entre tratamientos .....	89
5.4. Comparación de la evolución entre la relación hoja y tallo entre .....	
tratamientos .....	89
5.5. Índice de cosecha .....	90
5.6. Evolución de la tasa de materia seca aérea .....	91
5.7. Relación del crecimiento con el IAF; observaciones y simulaciones .....	92
5.7.1. Comparaciones a los 73 dds .....	92
5.7.2. Comparación a los 90 dds .....	93
5.7.3. Comparación a los 111 dds .....	95
5.7.4. Comparación a los 135 dds .....	97
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>100</b>
<b>7. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>102</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA .....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.	Coeficiente de extinción de la luz en función del IAF (van Keulen y Wolf, 1986) .....	17
Gráfico 2.	Representación gráfica de una curva típica de crecimiento, señalando las tres fases características de crecimiento (adaptado de Bidwell, 1987).....	21
Gráfico 3.	Variación de las temperaturas máximas y mínimas diarias, registradas durante el periodo de ensayo .....	45
Gráfico 4.	Distribución de la precipitación mensual (mm), registrada durante el periodo de ensayo y la registrada durante 20 años .....	46
Gráfico 5.	Variaciones de la radiación global diaria ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ) durante el periodo de ensayo .....	47
Gráfico 6.	Variaciones del índice de área foliar, T1.....	51
Gráfico 7.	Variaciones en la acumulación de materia seca aérea, T1 .....	52
Gráfico 8.	Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar, T1.....	53
Gráfico 9.	Relación entre la MSA y el VOLUMEN, T1 .....	54
Gráfico 10.	Evolución del peso específico foliar, T1 .....	55
Gráfico 11.	Relación entre hoja y tallo, T1 .....	56
Gráfico 12.	Relación entre inflorescencia y materia seca aérea, T1 .....	57
Gráfico 13.	Variaciones del índice de área foliar, T2 .....	58
Gráfico 14.	Variaciones en la acumulación de materia seca aérea, T2 .....	59
Gráfico 15.	Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar, T2 .....	60
Gráfico 16.	Relación entre la MSA y el VOLUMEN, T2 .....	61
Gráfico 17.	Evolución del peso específico foliar, T2.....	62
Gráfico 18.	Relación entre hoja y tallo, T2 .....	63
Gráfico 19.	Relación entre inflorescencia y materia seca aérea, T2 .....	64
Gráfico 20.	Variación del índice de área foliar, T3 .....	65
Gráfico 21.	Variación en la acumulación de materia seca aérea, T3 .....	66
Gráfico 22.	Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar, T3 .....	67
Gráfico 23.	Relación entre la MSA y el VOLUMEN, T3 .....	68
Gráfico 24.	Evolución del peso específico foliar, T3 .....	69
Gráfico 25.	Relación entre hoja y tallo, T3 .....	70
Gráfico 26.	Relación entre inflorescencia y materia seca aérea, T3 .....	71
Gráfico 27.	Variaciones del índice de área foliar, T4 .....	72
Gráfico 28.	Variaciones en la acumulación de materia seca aérea, T4 .....	73
Gráfico 29.	Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar, T4 .....	74
Gráfico 30.	Relación entre la MSA y el VOLUMEN, T4 .....	75
Gráfico 31.	Evolución del peso específico foliar, T4 .....	76
Gráfico 32.	Relación entre hoja y tallo, T4 .....	77
Gráfico 33.	Relación entre inflorescencia y materia seca aérea, T4 .....	78

Gráfico 34.	Expresión de la materia seca aérea en relación al índice de área foliar en T1 y T2, a los 73 dds .....	80
Gráfico 35.	Relación de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 90 dds, para T1, T2, T3 y T4 .....	81
Gráfico 36.	Expresión de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 90 dds, para (T1, T2, T3) y T4 .....	82
Gráfico 37.	Relación de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 111 dds, para T1, T2, T3 y T4 .....	83
Gráfico 38.	Expresión de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 111 dds, para T1, (T2, T3) y T4 .....	84
Gráfico 39.	Relación de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 135 dds, para T1, T2, T3 y T4 .....	85
Gráfico 40.	Expresión de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 135 dds, para T1, (T2, T3) y T4 .....	86
Gráfico 41.	Comparación de la relación MSA y VOLUMEN entre tratamientos T1 y T2, a los 73 dds .....	87
Gráfico 42.	Comparación de la relación MSA y VOLUMEN entre tratamientos T1, T2, T3 y T4, a los 90 dds .....	87
Gráfico 43.	Comparación de la relación MSA y VOLUMEN entre tratamientos T1, T2, T3 y T4, a los 111 dds .....	88
Gráfico 44.	Comparación de la relación MSA y VOLUMEN entre tratamientos T1, T2, T3 y T4, a los 135 dds .....	88
Gráfico 45.	Comparación del peso específico foliar entre tratamientos .....	89
Gráfico 46.	Comparación de la relación hoja y tallo, entre tratamientos .....	90
Gráfico 47.	Evolución de la tasa de MSA en los cuatro tratamientos .....	91
Gráfico 48.	Comparación de los coeficientes de regresión de la MSA en función al IAF, a los 73 dds .....	92
Gráfico 49.	Comparación con el modelo de cultivo WOFOST, a los 73 dds .....	93
Gráfico 50.	Comparación de los coeficientes de regresión de la MSA en función al IAF a los 90 dds .....	94
Gráfico 51.	Comparación con el modelo de cultivo WOFOST a los 90 dds .....	95
Gráfico 52.	Comparación de los coeficientes de regresión de la MSA en función al IAF a los 111 dds .....	96
Gráfico 53.	Comparación con el modelo de cultivo WOFOST a los 111 dds .....	97
Gráfico 54.	Comparación de los coeficientes de regresión de la MSA en función al IAF a los 135 dds .....	98
Gráfico 55.	Comparación con el modelo de cultivo WOFOST a los 135 dds .....	99



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Producción de quínoa en TM de los principales países productores en América Latina .....	7
Cuadro 2.	Caracterización de los modelos según el grado de complejidad y detalle (Kooman y Spitters, 1995) .....	26
Cuadro 3.	Características de suelo y clima que considera el modelo WOFOST (adaptado de Bermúdez, 1994).....	29
Cuadro 4.	Promedios mensuales climáticos de la zona de Choquenaira, registrados durante 20 años .....	31
Cuadro 5.	Condiciones climáticas consideradas (Rg: radiación global; Ea: tensión de vapor de agua; v: velocidad del viento; pp: precipitación mensual; # días lluvias: número de días con lluvia), (promedio de 5 años, Germain 2003) .....	43
Cuadro 6.	Parámetros fisiológicos utilizados por el modelo, para una quinua (WOFOST) en condiciones de Viacha .....	43
Cuadro 7.	Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, según la ecuación teórica obtenida mediante la simulación estándar .....	43
Cuadro 8.	Parámetros de regresión de la MSA en función del IAF, reportados a los 73 dds .....	79
Cuadro 9.	Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, reportados a los 90 dds .....	81
Cuadro 10.	Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, reportados a los 111 dds .....	82
Cuadro 11.	Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, reportados a los 135 dds .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de un sistema de producción NIVEL 1, la temperatura y la luz son las variables de entrada (Var.); la eficiencia fotosintética es una constante. Los rectángulos representan cantidades (var. de estado); los símbolos de la válvula, flujos (var. de cambio); los circuitos (var. auxiliares); var. subrayadas, (var. conducidas); líneas corrientes, flujos de materia: líneas cortadas, flujos de información (Penning de Vries <i>et al.</i> , 1989) .....	23
Figura 2.	Esquema simplificado de los procesos fisiológicos diarios considerados por WOFOST.....	29

## ÍNDICE DE ANEXOS

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Localización geográfica de la zona de Choquenaira .....	1 - A
Figura 2.	Metodología de muestreo de la materia seca total aérea MSA y el índice de área foliar IAF.....	11 - A

### LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 .	Características físicas del suelo de la E.E. de Choquenaira .....	2 - A
Cuadro 2.	Resultado de las características físico - químicas del suelo de la E.E. choquenaira. Proporcionado por el laboratorio de suelos de CETABOL JICA (Okinawa, Santa Cruz) .....	3 - A
Cuadro 3.	Flora natural, especies forrajeras y cultivables presentes en la zona de Choquenaira. ....	4 - A
Cuadro 4.	Variaciones del IAF, promedio, desvío estándar (DS), coeficiente de variación (CV), en el tratamiento 1.....	5 - A
Cuadro 5.	Variaciones del IAF, promedio, desvío estándar (DS), coeficiente de variación (CV), en el tratamiento 2 .....	5 - A
Cuadro 6.	Variaciones del IAF, promedio, desvío estándar (DS), coeficiente de variación (CV), en el tratamiento 3 .....	5 - A
Cuadro 7.	Variaciones del IAF, promedio, desvío estándar (DS), coeficiente de variación (CV), en el tratamiento 4 .....	5 - A
Cuadro 8.	Variaciones del PEF, promedio, desvío estándar (DS), coeficiente de variación (CV), en el tratamiento 1 .....	6 - A
Cuadro 9.	Diferencia de promedios del PEF, tratamiento 1 .....	6 - A
Cuadro 10.	Variaciones del PEF, promedio, desvío estándar (DS), coeficiente de variación (CV), en el tratamiento 2 .....	6 - A
Cuadro 11.	Diferencia de promedios de PEF, tratamiento 2 .....	6 - A
Cuadro 12.	Variaciones del PEF, promedio, desvío estándar (DS), coeficiente de variación (CV), en el tratamiento 3 .....	7 - A
Cuadro 13.	Diferencia de promedios del PEF, tratamiento 3 .....	7 - A
Cuadro 14.	Variaciones del PEF, promedio, desvío estándar (DS), coeficiente de variación (CV), en el tratamiento 4 .....	7 - A
Cuadro 15.	Diferencia de promedios del PEF, tratamiento 4 .....	7 - A
Cuadro 16.	Datos promedios de peso seco foliar y peso seco del tallo, y la relación que existe entre ambos durante su evolución, tratamiento 1. ....	8 - A
Cuadro 17.	Datos promedios de peso seco foliar y peso seco del tallo, y la relación que existe entre ambos durante su evolución, tratamiento 2. ....	8 - A
Cuadro 18.	Datos promedios de peso seco foliar y peso seco del tallo, y la relación que existe entre ambos durante su evolución, tratamiento 3. ....	8 - A

Cuadro 19. Datos promedios de peso seco foliar y peso seco del tallo, y la relación que existe entre ambos durante su evolución, tratamiento 4.....	8 - A
Cuadro 20. Datos promedios de inflorescencia y materia seca aérea y la relación entre ambos durante el ciclo del cultivo, T1. ....	9 - A
Cuadro 21. Datos promedios de inflorescencia y materia seca aérea y la relación entre ambos durante el ciclo del cultivo, T2 ....	9 - A
Cuadro 22. Datos promedios de inflorescencia y materia seca aérea y la relación entre ambos durante el ciclo del cultivo, T3. ....	9 - A
Cuadro 23. Datos promedios de inflorescencia y materia seca aérea y la relación entre ambos durante el ciclo del cultivo, T4 ....	9 - A
Cuadro 24. Resultados obtenidos de MSA e IAF mediante el modelo de simulación estándar de WOFOST .....	10 - A

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos importantes dentro de la agricultura es sin duda el estudio agronómico de las especies cultivadas, el mismo que ha conducido a los investigadores a realizar sondeos en diferentes áreas que influyen e interactúan en el complejo proceso de la producción vegetal.

La determinación de la productividad de un cultivo a partir de la cuantificación de biomasa puede conducir a consideraciones sobre el metabolismo de la planta, y las interacciones de los factores relacionados como la luz, asimilación de CO<sub>2</sub>, estructura del dosel, condiciones hídricas y nutritivas.

En consecuencia la eficiencia en la producción puede estimarse a través de la tasa de crecimiento, que está subordinada a la radiación interceptada por el cultivo y, por consecuencia, a su índice de área foliar. Las restricciones hídricas y minerales pueden incidir como factores secundarios en la tasa de crecimiento, por su influencia en la transformación de la radiación interceptada en materia seca.

Por lo general, las investigaciones realizadas en el cultivo de quinua no han tomado en cuenta la dinámica de desarrollo y crecimiento del cultivo. En especial no se ha relacionado la dinámica del crecimiento con la evolución del índice de área foliar.

La quinua por ser un cultivo de gran importancia para el altiplano boliviano y que en los últimos años en diferentes países se van desarrollando investigaciones respecto a su comportamiento agrofisiológico, además de considerar la producción potencial permitida por las condiciones termoradiativas y las propiedades fisiológicas del cultivo bajo condiciones de campo. Las diferencias entre lo observado y lo simulado por un modelo de cultivo en condiciones óptimas, sea sin restricciones hídrica, minerales y sin restricción fitosanitaria, enseñan las limitaciones en determinadas épocas.

Este ensayo pretende complementar o reforzar las investigaciones realizadas con anterioridad, para lo cual se definieron los siguientes objetivos:

### **1.1. Objetivo general**

- Relacionar la dinámica de crecimiento de la quinua con su expansión foliar.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Relacionar el crecimiento del cultivo con el índice de área foliar en sus diferentes fases de desarrollo.
- Comparar el comportamiento de las diferentes variedades de quinua en relación a la materia seca aérea y el índice de área foliar.
- Comparar el crecimiento a nivel de campo con simulaciones realizadas con el modelo de cultivo WOFOST.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Origen de la quinua

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es una planta originaria de la región andina de América del Sur. Varios hallazgos arqueológicos, a lo largo de la meseta andina, demuestran su utilización en la alimentación, juntamente con la kañiwa y papa entre otros (Gandarillas 1979). Se cultiva en esta región desde hace más de 7.000 años, constituyéndose en uno de los principales cultivos de grano (FAO, 1998).

Tapia (1997) indica que muchos autores, como Núñez, Towle y Boullaert, identifican a la zona de Los Andes como centro de origen de la quinua. También menciona que se cultiva desde Colombia hasta la Argentina.

Gandarillas *et al.* (1979) señalan que la quinua pertenece a la familia Chenopodiaceas, género *Chenopodium*, sección *Chenopodia*, subsección *Cellulata*, orden Centrospermales, clase Dicotiledónea, especie *Chenopodium quinoa* Willdenow. Mújica y Canahua (1989) citan a Giusti quien indica que existen cerca de 250 especies de *Chenopodium* a nivel mundial.

### 2.2. Descripción de la planta

Es una planta anual de tamaño muy variable, con altura de 0.5 m hasta 3.5 m, según los ecotipos, las razas y el medio ecológico donde se cultiven. Tapia (1979) cita a Pacheco y Morlon quienes señalan que la quinua tiene una raíz fasciculada, constituyéndose en una raíz vigorosa que llega a tener una profundidad de 0.5 a 2.8 m. A pocos centímetros del cuello ramifican las raíces secundarias y terciarias.

Gandarillas *et al.* (1979) señalan que el tallo es cilíndrico a la altura del cuello y después anguloso, debido a que sus hojas son alternas a lo largo de cada una de las cuatro caras, el color es variable, desde verde a rojo con diferentes tonalidades. Según el desarrollo de ramificaciones, se puede encontrar plantas con un solo tallo principal, o con ramas laterales cortas en ecotipos del altiplano; si disponen de mucho espacio ramifican, o por el contrario tienden a mostrar un tallo único.

Gandarillas *et al.* (1979) citan a Rea y Leon, quienes indican que las hojas son polimorfas, presentan pecíolos largos, finos y acanalados en su lado superior, las que nacen del tallo principal son más largas y más cortas que de las ramas secundarias. También mencionan que las inflorescencias son amarantiformes o glomeruladas, las mismas que están en función a la disposición de las flores a lo largo del eje principal o ejes secundarios; Las flores, hermafroditas o pistiladas, tienen el gineceo rodeado por cinco estambres; el fruto es un aquenio, cubierto por el perigonio, que se desprende fácilmente al frotarlo cuando está seco; el color del grano está asociado al color de la planta que puede ser verde, púrpura o rojo.

### **2.3. Características del cultivo**

#### **2.3.1. Características fisiológicas**

Gandarillas *et al.* (1979) citan a Zviercovitch quien menciona que la quinua ha sido clasificada como una planta C<sub>3</sub>, clasificación que se realizó en base al tipo anatómico de las hojas, fundamentalmente por la ausencia de la vaina de los haces y la presencia bien definida del parénquima clorofiliano de empalizada

Mujica *et al.* (1999) mencionan que, a pesar de ser una planta C<sub>3</sub>, es eficiente en el uso de agua, debido a que puede escapar, resistir y tolerar a la sequía gracias a los siguientes mecanismos: anatómicos (*menor número y tamaño de estomas, ubicación de los estomas en el envés de la hoja*); morfológicos (*menor tamaño de planta*); fenológico (*acortamiento del período de floración*), y bioquímicos (*mayor síntesis de prolina*) que contribuye a la acumulación de energía y nutrientes en contra de la sequía, que le permite mantener sus funciones vitales y acumular fotosintatos en tallos y granos.

Jacobsen *et al.* (2002) citan a Giusti quien mencionó que las hojas de quinua están cubiertas por oxalatos de calcio, tanto en el haz como en el envés, las cuales son bastante higroscópicas, que permite capturar la humedad atmosférica nocturna, controlar la excesiva transpiración, así como reflejar los rayos luminosos,

disminuyendo la radiación directa sobre las hojas, y evitar de esta manera el sobrecalentamiento.

Las respuestas favorables a la falta de agua, nos permiten afirmar y considerarla como una planta que soporta déficit severo y prolongado de humedad durante diferentes etapas de su crecimiento y desarrollo (Mújica y Canahua, 1989).

### **2.3.2. Características fenológicas**

Mújica y Canahua (1989) mencionan que la fenología representa los cambios externos visibles que experimenta la planta durante el proceso de desarrollo y que está influenciado por las condiciones ambientales. Los mismos autores indican que la quinua presenta fases fenológicas muy marcadas y diferenciadas. Sin embargo hacen énfasis a las modificaciones que suceden durante el ciclo del cultivo como: el pronto desarrollo radicular, madurez prematura, acortamiento del periodo de floración como respuesta a las condiciones de sequía, y la susceptibilidad al fotoperiodo que provoca el acortamiento del ciclo vegetativo.

### **2.3.3. Descripción de variedades utilizadas en el ensayo**

**Variedad Blanca de Yanamuyu**, corresponde a una variedad local de las afueras de Viacha. Presenta características heterogéneas, de crecimiento erguido, no ramifica a bajas densidades, variedad amarga con alto porcentaje de saponina. Posee en su panoja un 75% de grano mediano a pequeño, con mayor proporción de grano pequeño respecto a la variedad Surumi.

**Variedad Surumi**, esta variedad fue liberada en 1997, por el programa quinua IBTA. Corresponde a una variedad mejorada, que proviene genéticamente del cruce entre las variedades Sajama y Ch'íara. Es catalogada como una variedad de ciclo tardío que ramifica a bajas densidades. Tiene una altura promedio de 1.3 m, coloración púrpura a la floración, y a la madurez fisiológica se torna rosado. Panoja glomerulada, de grano mediano, diámetro promedio 2.25 mm, dulce, con el perigonio de color rosado intenso a la madurez.



El rendimiento obtenido en condiciones experimentales fue  $2120 \text{ kg ha}^{-1}$  y en cultivos extensivos de  $1100 \text{ kg ha}^{-1}$ , medianamente tolerante al mildiu, resistente a la sequía y tolerante a heladas ( $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  en floración) (IBTA, ONS, 1997).

**Variedad forrajera (línea 364)**, proviene de la estación experimental de Patacamaya ex. IBTA. Fue seleccionada por sus características forrajeras. Es una variedad de ciclo tardío, que ramifica bastante a bajas densidades. El follaje es de color verde, coloración que se mantiene hasta la fase de grano pastoso, y se torna amarillo pálido a la madurez. Presenta una panoja laxa y que tiene una inflorescencia de color verde intenso a la floración y de color amarillo pálido a la cosecha. Los granos son pequeños a medianos, de color blanco, dulce, con bajo contenido de saponina.

#### **2.3.4. Rendimiento y superficie cultivada**

La producción de quinua a nivel mundial está basada principalmente en países de América Latina (Bolivia, Perú, Ecuador). Con una producción para Bolivia en el año 2000 de 25000 TM, Perú con 30000 TM y Ecuador con 938 TM (FAO, 2001).

Ramos (1999) indica que en Bolivia la quinua se cultiva en diferentes lugares del Altiplano, principalmente en los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí y en menor proporción en los valles interandinos de Cochabamba, Tarija y Chuquisaca.

La superficie cultivada cubre menos del 2% del total de la superficie cultivada en el país, y casi un 5% de superficie cultivada de los cereales. Representó el 2,2% del PIB en el año 2000 (AGRODATA, 2001).

En el cuadro 1 se observa, como la producción de quinua se incrementó desde hace 6 años. Para Bolivia, existe una disminución en la producción en el año 1998, 1999 y 2000, la producción no llegó a superar al año 1997, por el contrario Perú y Ecuador incrementan su producción anualmente (FAO, 2001).

**Cuadro 1: Producción de quinua en TM de los principales países productores en América Latina.**

<b>País /Año</b>	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Bolivia	18.814	23.490	26.360	20.291	22.498	25.000
Ecuador	408	555	304	938	938	938
Perú	16.846	16.070	23.612	28.614	28.439	30.000
<b>TOTAL</b>	<b>36.068</b>	<b>40.115</b>	<b>50.276</b>	<b>49.843</b>	<b>51.875</b>	<b>55.938</b>

Fuente: FAO, (2001).

## **2.4. Requerimientos del cultivo**

### **2.4.1. Clima**

Gracias a la variabilidad en germoplasma, la quinua puede adaptarse a diferentes tipos de climas, desde el desierto caluroso seco, y las costas del nivel del mar húmedo y cálido, hasta el frío seco del Altiplano, pasando por valles y cordilleras de las grandes altitudes (Frere, 1978). Normalmente se cultiva entre los 3000 y 4000 m.s.n.m, a veces desde los 200 m.s.n.m.

Berti *et al.* (1997) mencionan a Whali, quien señaló, que la quinua posee cualidades que le permiten adaptarse a condiciones ambientales diversas como; las condiciones a nivel del mar, sequías, heladas, suelos pobres, entre otros.

### **2.4.2. Precipitación y temperatura**

Mújica *et al.* (2002) mencionan que la quinua es variable en sus requerimientos de precipitación, que varía de 600 a 800 mm en Los Andes ecuatorianos y de 500 a 800 mm en la región del Lago Titicaca y de 200 a 400 mm en el sur de Bolivia.

Rea *et al.* (1979) señalan acerca de la temperatura que el promedio requerido para la quinua esta alrededor de 15° a 25°C. Mújica *et al.* (2001) mencionan, que este cultivo en algunas etapas fenológicas puede escapar y tolerar temperaturas inferiores a 8°C, las fases más susceptibles son a la floración y el llenado de los granos, y la más tolerante la ramificación. Las temperaturas inferiores a 2 °C en fase de fructificación pueden afectar seriamente la producción (Tapia, 1979).

### **2.4.3. Fertilización**

Epstein (2000) menciona que existe una interdependencia entre las actividades de la raíz y la zona aérea, obteniéndose excelentes correlaciones entre la velocidad de crecimiento aéreo y la velocidad de absorción de nitrógeno, fósforo y potasio. Rea *et al.* (1979) indican que el cultivo de la quinua, por ser un cultivo rustico, a menudo se produce en suelos pobres, así también los rendimientos son bajos.

Tapia (1997) cita a Calzada como el primero en determinar el efecto de la materia orgánica en el rendimiento de materia seca, en relación con una repuesta al nitrógeno. Posteriores investigaciones señalaron que los abonos orgánicos no son utilizados eficientemente, sobre todo los aplicados el mismo año de la siembra, y se utiliza mejor el abonamiento químico, recomendando la formula 80 – 40 – 0, aplicando en forma fraccionada, la primera al momento de la siembra y la segunda al realizar el deshierbe, mediante chorro continuo a un lado de la planta. También la quinua es exigente en calcio, moderadamente en fósforo (Rea, 1979).

Tapia (1979) recomienda una fertilización fraccionada del nitrógeno, la primera al momento de la siembra y la segunda a los 100 días después de la siembra, que coincida con la época de mayor precipitación (enero - febrero), cuando la planta realiza un mayor aprovechamiento.

Ávila y Etchevers (1988) señalan que se debe realizar una adecuada fertilización nitrogenada, potásica y fosforada para asegurar rendimientos aceptables (alrededor de 3000 kg.ha<sup>-1</sup>). Jacobsen *et al.* (1989) mencionan que la fertilización nitrogenada tiene mayor influencia, incrementando los rendimientos, cuando la dosis de nitrógeno varía de 40 a 160 kg.ha<sup>-1</sup>. Tapia (1997) cita a Medina, Herquino y Rivero y señalan que la producción de quinua se incrementa en 16 kg.ha<sup>-1</sup> por kg. de nitrógeno por lo que se hace rentable la fertilización.

### **2.4.4. Suelos**

Rea *et al.* (1979) indican que la quinua prefiere suelos francos, semiprofundos con buen drenaje y contenido de materia orgánica, con un pH del suelo que puede variar

entre 4.5 a 8.0. Tapia (1997) al respecto señala que la quinua se adapta a diferentes suelos, que tengan buena fertilidad y que no sean anegadizos.

## **2.5. Factores adversos del cultivo**

Blanco (1988) indica que los factores abióticos adversos influyen en la producción y productividad de la quinua y revisten gran importancia, entre los cuales tenemos: a la sequía, helada, salinidad de los suelos, granizada, nevada, viento, inundaciones y exceso de calor, afectando la producción, desde pequeños daños hasta la pérdida total de la cosecha. Ortiz y Zanabria (1997) citan a Quispe quien mencionó que las plagas influyen en la reducción del 40% de la producción total (Gusano cortador y minador).

Las granizadas, que son esporádicas y muy localizadas, pueden ocasionar daños irreversibles, especialmente en la fase de madurez, puede provocar el desprendimiento de los granos y consecuentemente la pérdida total de la cosecha.

En fase vegetativa afecta el área foliar, reduciendo la superficie fotosintetizante, especialmente en el periodo juvenil de la lámina foliar y en el ángulo de inserción de las hojas, y en casos extremos puede llegar a dañar a los tallos. Sin embargo, existen cultivares con mayor tolerancia al granizo, dado principalmente por el menor ángulo de inserción de las hojas, mayor grosor y resistencia de hojas y tallos (Blanco, 1988).

## **2.6. Nutrición mineral**

Chilón (1997) indica que, para una determinada planta, el nivel superior de producción de materia seca se logra cuando todos los factores de crecimiento se dan simultáneamente y constantemente en su valor óptimo en el curso de las diversas fases de desarrollo.

Bertsch (1995) señala que el nitrógeno favorece el desarrollo exuberante del follaje, acentúa el color verde en las hojas, confiere succulencia a los tejidos, aumenta el tenor de proteína, alarga el ciclo vegetativo de los cultivos. Chilón (1997) señala que

la influencia del nitrógeno durante la fase vegetativa tendrá una fuerte influencia en la magnitud de la cosecha. Machicado (1977) indica que el exceso de nitrógeno propicia el acame y el retraso en la madurez del fruto.

## **2.7. Función fisiológica del nitrógeno**

Mattos (1993) menciona que el nitrógeno es el componente fundamental de todas las moléculas orgánicas involucradas en los procesos de crecimiento y desarrollo vegetal como los aminoácidos (proteínas estructurales y enzimas) ácidos nucleicos, clorofila, hormonas y otros compuestos nitrogenados con funciones variadas, y participa activamente en los principales procesos del metabolismo celular como la fotosíntesis, la respiración y la síntesis proteica.

## **2.8. Desarrollo y crecimiento**

Para Diehl *et al.* (1985) el desarrollo es el cambio sucesivo del vegetal (periodo vegetativo, floración, fructificación, etc.) durante las cuales sus exigencias son frecuentemente muy diferentes, mientras que el crecimiento es el incremento mas o menos continuo del tamaño, volumen o del peso que la planta experimenta durante el transcurso de su vida.

van Keulen y Wolf (1986) indican que un cultivo no solamente acumula peso, sino que atraviesa sucesivos estadios de desarrollo fenológico. Ambos procesos se encuentran fuertemente interrelacionados, motivo por el cual ambos términos son frecuentemente confundidos entre si.

### **2.8.1. Producción primaria en crecimiento**

Roberts *et al.* (1988) mencionan que la biomasa vegetal ( $W$ ) es el peso del material vivo, contenido arriba y abajo de una unidad de superficie. Producción ( $P$ ) es la biomasa o peso de la materia orgánica asimilada por una comunidad vegetal o especie, en una unidad de superficie, denominada producción primaria, que puede expresarse en dos formas; *producción primaria bruta* ( $P_g$ ) (que incluye las pérdidas por respiración). *La producción primaria neta* ( $P_n$ ) (no incluye las pérdidas debido a

la respiración). La producción primaria neta puede expresarse mediante la siguiente relación matemática:

$$P_n = Q * I * E - R$$

***P<sub>n</sub>*** es la producción primaria neta, ***Q*** es la cantidad de luz incidente, ***I*** es la fracción de luz interceptada y absorbida, ***E*** es la eficiencia de conversión fotosintética, ***R*** son las pérdidas respiratorias de la biomasa (Roberts *et al.* 1988).

Sin embargo, mediante dicha ecuación la producción es expresada en términos de peso seco de materia orgánica, también se puede expresar en cualquier cantidad almacenada, como carbono o energía (Roberts *et al.*, 1988).

### **2.8.2. Desarrollo, factores que afectan el desarrollo**

Fernández (1986) indica que el término desarrollo se emplea a la serie de cambios cualitativos que ocurre durante el ciclo de vida de un organismo. Al respecto Salisbury y Cleon (2000) señalan que el crecimiento es el cambio cuantitativo del organismo y que va acompañado de sucesivos estadios de desarrollo fenológico, lo que implica un aumento en la complejidad del organismo.

En la mayoría de las plantas superiores el desarrollo es identificado en las diferentes fases fenológicas, estas fases o aparición de los órganos son características de cada especie y es casi independiente de las circunstancias, mientras que el momento y la tasa de aparición dependen enteramente de las condiciones medio ambientales, afectados principalmente por la temperatura y la longitud del día (van Keulen y Wolf, 1986).

#### **2.8.2.1. Temperatura**

Mouliá *et al.* (1995) citan a Brisson y Delécolle quienes señalan que la temperatura es el principal factor de acción sobre el desarrollo es por eso que se lo considera el motor del desarrollo.

Salisbury y Cleon (2000) citan a Frits y Went quienes mencionan que el crecimiento y el desarrollo son estimulados por la alternancia de temperaturas diurnas y nocturnas, cada especie o variedad requiere en cualquier etapa de su ciclo de vida temperaturas diferentes, así las temperaturas elevadas acortan el tiempo de entrada a una fase fenológica, por tanto mas corto será el ciclo del cultivo y mas alta la tasa de desarrollo, este desarrollo elevado nos dará una baja producción final de biomasa debido a la reducción en la fase lineal de crecimiento incluida la biomasa de los órganos asimilatorios.

### **2.8.2.2. Fotoperiodo**

Prácticamente el fotoperiodo influye sobre los aspectos del crecimiento y desarrollo, así como la elongación del tallo, crecimiento de hojas, formación de órganos de almacenamiento, caída de hojas que ocurre de forma sincronizada (Salisbury y Cleon, 2000).

### **2.8.3. Crecimiento, factores que afectan el crecimiento**

Ritchie y Nesmith (1991) citan a van Keulen y Wolf y mencionan que el crecimiento es un proceso que está estrechamente interrelacionado con el desarrollo. El crecimiento es un conjunto coordinado de procesos cuantitativos del aumento irreversible de tamaño, peso, volumen, y área a través del tiempo. Al respecto Rodríguez (1991) indica que el crecimiento va acompañado del desarrollo de nuevos órganos con funciones especializadas en forma casi continua.

Goudriaan y van Laar (1994) señalan que el crecimiento es un proceso fisiológico complejo, que se verifica gracias al proceso fotosintético de transformación de la energía lumínica en energía química, que se puede almacenar bajo la forma de distintos compuestos presentes en la biomasa. Para Roberts *et al.* (1988) el crecimiento se relaciona con el desarrollo a través de la tasa de repartición de asimilatos entre los diferentes órganos de la planta, este patrón de distribución es propio de cada especie y está relacionado con el estadio de desarrollo.

Moulia *et al.* (1995) señalan que el crecimiento es el incremento de biomasa y que está influenciado por las condiciones internas de la planta y las condiciones del medio. Para Fernández (1986) los factores que influyen en el crecimiento son: la fotosíntesis, respiración, transpiración, temperatura, precipitación, radiación, absorción de agua y sustancias nutritivas.

Los factores fisiológicos que afectan directamente al crecimiento según Beukema y van der Zaag (1990), son: la fotosíntesis y la respiración, mientras que para van Keulen y Wolf (1986) identifican a los factores ambientales tales como la temperatura, la radiación, la disponibilidad de agua y nutrientes.

### **2.8.3.1. Temperatura como factor de crecimiento**

Para Bohórquez y Camilo (1995) todos los procesos de crecimiento de la planta así como: la fotosíntesis, el transporte de nutrientes, la respiración y la transpiración, tienden a reaccionar a la variación de temperaturas. Sin embargo, existe un óptimo que varía de una especie a otra con una diferencia marcada entre plantas C3 y C4 (Levrault y Crozat, 2002).

Lawlor (1987) menciona al respecto, que la fotosíntesis de plantas C3 a temperaturas menores a los 10°C son más eficientes que las plantas C4. Cuando la temperatura aumenta, la fotosíntesis en plantas C3 también aumenta hasta un óptimo tolerante entre 15 y 25°C asumiendo que no hay estrés hídrico por encima de los 30°C. También señala que la temperatura tiene una acción directa en dos procesos de gran importancia en el crecimiento de las plantas como ser la actividad de asimilación del dióxido de carbono  $CO_2$  y la respiración de mantenimiento.

Diehl *et al.* (1985) indican que la asimilación de  $CO_2$  del aire, mediante el proceso fotosintético, está bajo la dependencia del calor. Lawlor (1987) señala que la asimilación del dióxido de carbono disminuye rápidamente, y se detiene cuando alcanza temperaturas superiores a los 40°C.



van Diepen *et al.* (1988) indican que la respiración de mantenimiento de un órgano depende de la temperatura, como de la naturaleza del cultivo, sea el órgano a considerar y del peso vivo. Para Goudriaan y van Laar (1994) la respiración de mantenimiento es necesaria para regenerar los componentes desintegrados, la prevención de los potenciales eléctricos sobre la membrana celular y, también para la manutención de la actividad metabólica (Penning de Vries *et al.*, 1989).

### 2.8.3.2. Radiación solar

Doorenbos y Kassam (1986) mencionan que la producción total de materia seca está en función a la cantidad total de radiación interceptada, por tener un efecto directo en la fotosíntesis y que influye en el crecimiento. Jones (1988) indica que las plantas generalmente utilizan menos del 5% de la energía incidente en el proceso fotosintético.

Bohórquez y Camilo (1995) señalan que la luz tiene un efecto importante sobre el crecimiento de las plantas; es la fuente de energía para la fotosíntesis, por lo que tiene un efecto directo sobre el suministro de alimento, cuya cantidad en cada uno de los tejidos influye en el índice de la división celular .A su vez esto afecta el crecimiento de todos los órganos de la planta.

Vitkievich (1979) indica que la cantidad de radiación solar que reciben las plantas es fundamental para la producción agrícola, consecuentemente la radiación global interceptada ( $Rg_{int.}$ ) está en función al índice de área foliar.

Según la ley de Beer se tiene:  $Rg_{int} = a(1 - e)^{-k*IAF}$

Donde:

$a$  = coeficiente generalmente estimado a 0.95

$k$  = coeficiente de extinción

$e$  = número de Nepper (2.71828)

$IAF$  = índice de área foliar

### **2.8.3.3. Disponibilidad de agua**

Diehl *et al.* (1985) indican que el agua participa en todos los procesos de crecimiento y desarrollo; desde la germinación hasta la madurez fisiológica del cultivo, siendo el único medio de transporte de elementos nutritivos y que favorece la conservación de la turgencia celular, Jones (1988) al respecto indica que el agua cumple doble función en la fisiología de la planta, primero determina la tasa de pérdidas de agua mediante la transpiración, segundo por que la humedad tiene un efecto directo sobre los estomas de muchas plantas, de tal manera que estos tienden a cerrarse, restringiendo la pérdida de agua, pero reduciendo la asimilación de CO<sub>2</sub> ().

### **2.8.3.4. Disponibilidad de nutrientes**

La alimentación hídrica y la nutrición mineral interactúan fuertemente sobre el crecimiento de la planta, así el nivel de fertilización nitrogenada condiciona la eficiencia de un cultivo bajo condiciones de riego y sin riego, es por eso que se considera al nitrógeno como el factor limitante más importante, conjuntamente con el agua, ya que las necesidades de las plantas son máximas en la fase de crecimiento activo (Levrault y Crozat, 2002).

Suppo (1982) indica que el crecimiento está influenciado por la disponibilidad de ciertos elementos *esenciales* para el metabolismo de sus organismos, pero Morales (1988) señala que estos elementos esenciales pueden ser tomados de la parte líquida del suelo como los iones que precisa (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, KO<sub>2</sub><sup>-</sup>, P<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, etc.), así mismo el nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono pueden ser tomados de la parte gaseosa del suelo y de la atmósfera.

## **2.8.4. El sistema asimilatorio**

### **2.8.4.1. Duración del área foliar**

Salisbury y Cleon (2000) citan a Sesták quien mencionó que con el crecimiento de las hojas la capacidad fotosintética aumenta hasta que se desarrollan por completo, a partir de ese momento esa capacidad tiende a disminuir con lentitud, las hojas

viejas se tornan amarillas pierden la capacidad de fotosintetizar debido a la degradación de la clorofila y la pérdida de cloroplastos funcionales.

Beukema y van der Zaag (1990) señalan que existe un marcado efecto de la edad del tejido asimilatorio sobre la tasa de fotosíntesis. Se ha demostrado que el envejecimiento de las hojas entre 25 a 75 días de su aparición provoca una reducción de la capacidad fotosintética en un tercio. Este envejecimiento se debe a los periodos de sequía prolongados, las altas temperaturas y recortes de nutrientes, especialmente nitrógeno.

Para un índice foliar dado, la duración y conservación de su actividad fotosintética es importante ya que ello determina la producción de biomasa. Pero los riesgos climáticos limitan las posibilidades de alargamiento del ciclo: descensos de temperaturas en climas templados, problemas hídricos en climas cálidos (Levrault y Crozat, 2002).

#### **2.8.4.2. Peso específico foliar**

La tasa máxima de asimilación está relacionada con el grosor de la hoja (peso específico foliar), factor que puede ser el principal causante de las diferencias entre máximas tasas fotosintéticas entre cultivares y entre plantas estudiadas en campo y en fitotrones, por lo que el peso específico foliar es esencial en la modelación del crecimiento (Penning de Vries *et al.*, 1989).

Bohórquez y Camilo (1995) mencionan que las hojas expuestas a la luz solar brillante contienen más azúcar y menos agua que la hoja de la misma planta que crece a la sombra, esto ocurre por que la primera efectúa la fotosíntesis y la respiración con mayor rapidez, influyendo en el peso foliar.

#### **2.8.4.3. Índice de área foliar**

Para determinar la productividad de un cultivo, es conveniente expresar su comportamiento foliar por unidad de área de terreno. Esto es el índice de área foliar, que valora la velocidad con que la planta ocupa el área del suelo disponible (Beadle

*et al.*, 1988). También describe la dimensión del sistema fotosintético de una comunidad vegetal (Rodríguez, 1991) y puede ser calculada mediante la relación:

$$IAF = \frac{Si}{P}$$

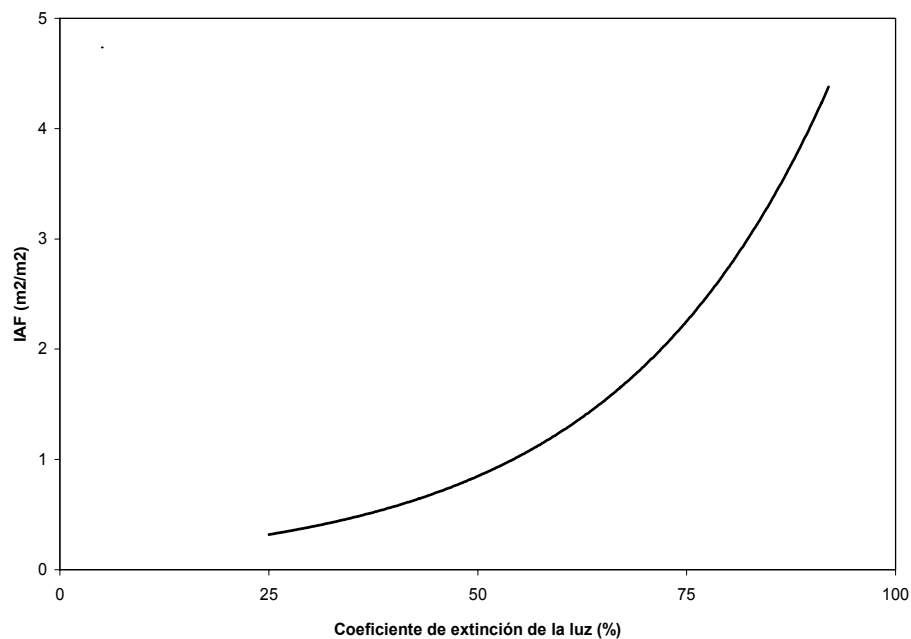
Donde:

$Si$  = es la superficie foliar funcional (verde) del cultivo que se encuentra en la superficie  $P$  del terreno.

$P$  = es la superficie del terreno ocupada por  $Si$ .

$IAF$  = índice de área foliar.

Para Levrault y Crozat (2002) el índice de área foliar óptimo difiere según la especie y su porte; aproximadamente 6 para las plantas con porte erecto como el arroz y 3 a 4 para las plantas con porte extendido como la papa. La gráfica 1 muestra la relación que existe entre la extinción de luz y el IAF.



**Gráfico 1. Coeficiente de extinción de la luz en función del IAF (van Keulen y Wolf, 1986).**

#### **2.8.4.4. Posición de las hojas e intercepción de la luz**

Heemst (1986) menciona que las plantas no presentan capas horizontales de hojas, pero los distintos niveles del follaje son capaces de interceptar toda la radiación en

diferentes proporciones, siendo que a mayor área foliar por área de suelo cubierto, mayor la cantidad de luz interceptada.

## **2.9. Análisis de crecimiento**

Bertsch (1995) indica que el análisis de la curva de crecimiento resulta útil para aplicar los conocimientos sobre el crecimiento vegetal en las recomendaciones nutricionales para los cultivos. Benincasa (1988), al respecto, añade que el análisis de crecimiento en la actualidad es el medio más accesible y preciso para dar validez e inferir en la contribución de diferentes procesos fisiológicos sobre el comportamiento vegetal.

### **2.9.1. Evaluación del crecimiento**

Roberts *et al.* (1988) indican que, para realizar el análisis de crecimiento de un cultivo, simplemente se requiere dos tipos de mediciones: el peso seco de la planta (Biomasa vegetal) que comprende todos los órganos, y el tamaño del sistema asimilatorio que, por lo general, es el área foliar.

#### **2.9.1.1. Medición de biomasa vegetal**

Roberts *et al.* (1988) mencionan que las mediciones de biomasa por lo general se realizan durante todo el ciclo del cultivo, a intervalos regulares de tiempo, adecuado al patrón de crecimiento de la especie en estudio, por lo general de un mes. También señalan que las muestras pueden ser colectadas de plantas individuales, o derivados de doseles enteros, con métodos destructivos y no destructivos.

#### **2.9.1.2. Medición del área foliar**

Existe diversos métodos para estimar el área foliar, los métodos manuales que determinan el área foliar con el uso de hojas milimetradas y una balanza de precisión que es un trabajo moroso. Otros métodos que facilitan el análisis se realizan mediante imágenes tomadas en videos y otros en cámaras fotográficas,

posteriormente las imágenes son llevadas a computadora y analizadas mediante programas específicos (Catacora, 1996).

#### **2.9.1.3. Diseño del muestreo**

Roberts *et al.* (1988) indican que el área designada para este tipo de estudios debe corresponder a unidades de muestras seleccionadas al azar. Las plantas deben escogerse al inicio del experimento y deben ser agrupadas en base a su tamaño. La superficie de muestreo puede ser de 1.0 m<sup>2</sup> ó 0.5 m<sup>2</sup>, situadas al centro de cada parcela; no debe afectar a los cuadros adyacentes, la zona de amortiguamiento deberá tener por lo menos el doble de la altura del dosel para evitar una excesiva penetración de la luz en otros cuadros de la muestra.

#### **2.9.1.4. Cosecha, clasificación y secado de muestras**

Roberts *et al.* (1988) señalan que las plantas que se encuentran dentro de los cuadros seleccionados deben ser cortadas al ras del suelo. También recomiendan separar todo el material necrótico del material vivo, y secarlo en horno con circulación de aire hasta 80 °C hasta obtener peso constante y, finalmente pesar en balanza de precisión.

#### **2.9.2. Análisis funcional del crecimiento**

Muchos investigadores han obtenido la curva de crecimiento representado el tamaño o peso de un organismo en función del tiempo. A menudo la curva de crecimiento puede ajustarse con una función matemática sencilla; una recta o una curva simple en forma de una sigmoide (Rodríguez, 1991).

Para Beadle (1988) la forma clásica del análisis de crecimiento ha sido mejorada a través de un nuevo enfoque denominado *análisis funcional del crecimiento o dinámico* propuesto por Radford en el año 1967. Gracias a la disponibilidad de computadoras y a las limitaciones del análisis clásico, los datos pueden ser ajustados y empleados en forma mas precisa y adecuada a través de funciones

polinomiales y logísticas, y establecer relaciones entre biomasa versus tiempo y superficie asimilatoria versus tiempo.

El crecimiento vegetal puede describirse en términos matemáticos para comprender mejor el patrón del mismo. Los modelos matemáticos actuales integran factores medio ambientales al modelo de crecimiento simple, obteniéndose resultados muy interesantes que relacionan el crecimiento con las capacidades fisiológicas o bioquímicas de las partes en desarrollo (Bidwell, 1987).

### **2.9.2.1. Curva de crecimiento sigmoideal**

Representada bajo la forma típica de una “S”, idealizada para numerosas plantas anuales y partes individuales. La curva presenta el tamaño acumulado en función del tiempo. En general se pueden detectar tres fases principales:

1. fase logarítmica o inicial
2. fase lineal
3. fase final de senectud.

**Fase logarítmica o inicial**, durante la primera fase exponencial de crecimiento (Gráfico 2), la mayoría del espacio alrededor de la planta no ha sido aún ocupado, siendo el crecimiento mayormente vegetativo. Cada nueva hoja formada contribuye a incrementar el crecimiento, por lo que la tasa de crecimiento relativo durante esta fase es constante, pudiendo duplicarse la biomasa en una semana (Goudriaan y van Laar, 1994).

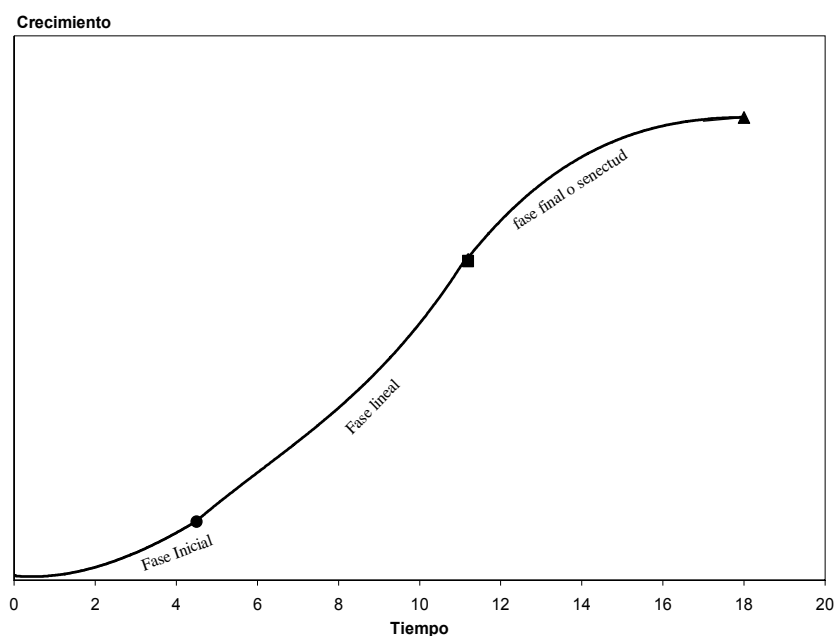
Durante esta fase, la tasa de crecimiento, obtenida por la derivada de la anterior función, aumenta continuamente, en forma exponencial, conforme a la ley de interés compuesto, y se representa linealmente en una escala logarítmica (Bidwell, 1987).

**Fase lineal**, Goudriaan y van Laar (1994) señalan que, después de la fase de crecimiento inicial, las hojas empiezan a sombrearse unas a otras y, sobre índices de área foliar superior a 3, el incremento de hojas difícilmente incrementa la cantidad de luz interceptada. En este momento el crecimiento sigue una función lineal, fase

en que la mayoría de la materia seca es acumulada. Bidwell (1987) menciona que durante esta fase, la tasa de crecimiento se torna constante y no está relacionada al tamaño anterior del organismo.

**Fase final o madurez**, hacia el final del ciclo del cultivo (Gráfico 2), por lo general existe pérdida de hojas y el crecimiento se detiene. Contrariamente a la transición de la fase exponencial a la lineal, no existe una regla para distinguir el inicio de esta fase final, ya que depende en realidad del cultivo, de las condiciones del cultivo y del momento en que acaba la fase lineal (Goudriaan y van Laar, 1994).

Bidwell (1988) compara la fase final con una expresión cinética monomolecular, que finaliza en una fase de decrecimiento exponencial, aunque esta función no muestra una fase lineal previa. También menciona que esta fase se describe mediante ecuaciones logísticas y otras ecuaciones mas complicadas de la misma familia, pero es necesario determinar la máxima biomasa de antemano, por lo que dichas ecuaciones no son útiles cuando se quiere simular el crecimiento. Goudriaan y van Laar (1994) añaden que la ecuación exponencial es la más adecuada, dentro de ciertos límites.



**Gráfico 2. Representación gráfica de una curva típica de crecimiento, presenta las tres fases características del crecimiento (adaptado de Bidwell, 1987).**



## **2.10. Restricción**

Jonh (1982) menciona que la producción de biomasa está sujeta a una variedad de restricciones ambientales, las mas frecuentes están relacionadas con los déficit y excesos en el suministro de energía solar, agua y nutrientes minerales, definiendo a la restricción o “stress” como las limitantes externas que frenan o reducen la tasa de producción de toda la vegetación o parte de ella, el efecto de las plagas y enfermedades son menores en comparación a las condiciones medioambientales desfavorables (especialmente restricciones hídricas y nutricionales).

## **2.11. Producción potencial**

### **2.11.1. Definición**

van Keulen y Wolf (1986) definen a la producción potencial de un cultivo, como la producción total de materia seca o parte de la cobertura verde del mismo y, que durante todo su ciclo ha recibido una alimentación óptima de agua y minerales. Goudriaan y van Laar (1994) añaden que la producción potencial se da cuando el cultivo no ha sufrido limitaciones por parte de factores climáticos, edáficos ni la incidencia de plagas y enfermedades.

En consecuencia el nivel de producción potencial de un cultivo alcanza cuando: la tasa de crecimiento llega a un óptimo y está en función del estado fenológico, del clima imperante, en especial de la temperatura y radiación. En condiciones de completa cobertura vegetal, la tasa de crecimiento se define como tasa de crecimiento potencial y el rendimiento denominado “rendimiento potencial” (Penning de Vries *et al.* 1989).

de Wit (1986) establece que los únicos factores que gobiernan la producción potencial son las características genéticas del cultivar, y las características ambientales. Kooman (1995) añade que las más importantes son: la temperatura, radiación solar y el fotoperiodo.

## 2.11.2. Niveles de producción

De Wit (1986) propuso 4 niveles de producción vegetal, basados en los factores limitantes del crecimiento y ordenadas según los rendimientos decrecientes:

**Nivel de producción 1**, corresponde al nivel de producción “potencial”, donde la tasa de crecimiento depende únicamente del clima en particular de la temperatura y radiación, y las condiciones hídricas y nutricionales son adecuadas para el cultivo. En la figura 1 se muestra un diagrama de producción para este nivel (Penning de Vries *et al.*, 1989).

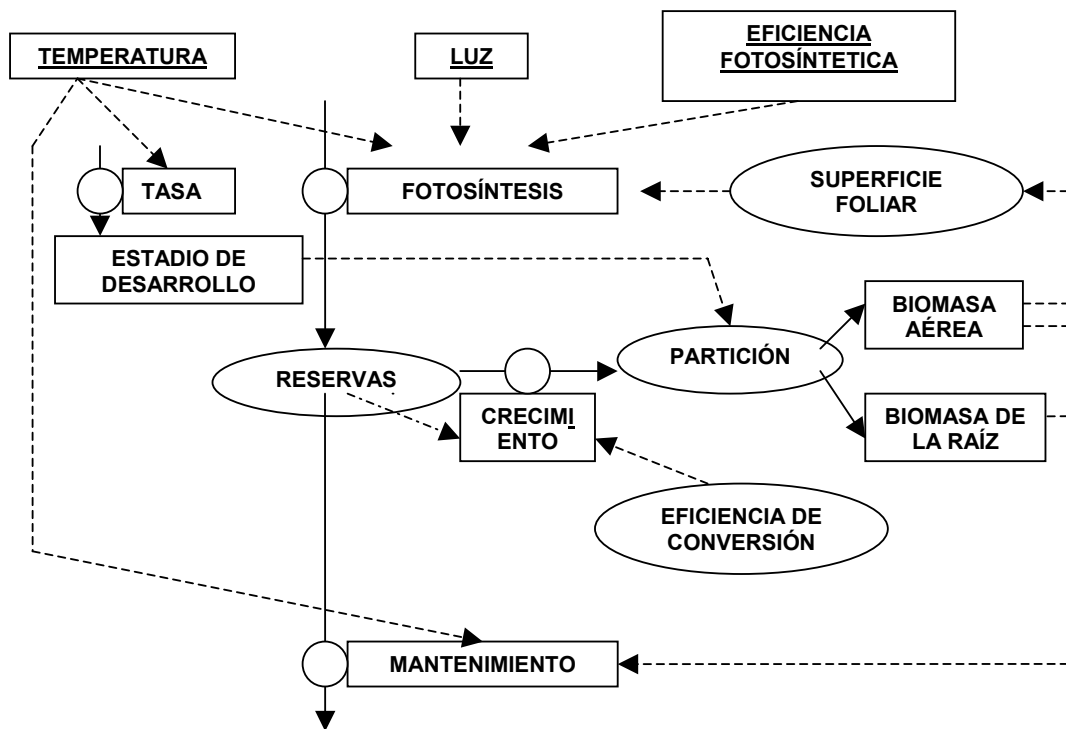


Figura 1. Diagrama de un sistema de producción NIVEL 1, la temperatura y la luz son las variables conductoras (Var.): la eficiencia fotosintética es una constante. Los rectángulos representan cantidades (var. de estado); los símbolos de válvula, flujos (var. de cambio); los círculos (var. auxiliares); var. Subrayadas, (var. de entrada); líneas corrientes, flujos de materia: líneas cortadas, flujo de información (Penning de Vries *et al.*, 1989).

**Nivel de producción 2**, para Goudriaan y Van Laar (1994) la restricción hídrica se presenta como el principal factor limitante, sin restricción nutricional. Esta situación no se da con frecuencia, ya que los elementos fundamentales son el grado de aprovechamiento del agua del suelo y la eficiencia de uso por el cultivo.

**Nivel de producción 3**, este nivel es restringido principalmente por las deficiencias de nitrógeno, por lo menos durante una parte del ciclo del cultivo. Así mismo, la tasa de crecimiento puede ser limitada por deficiencias hídricas o por malas condiciones ambientales durante el resto del ciclo. Este hecho se presenta frecuentemente en sistemas agrícolas de todo el mundo.

**Nivel de producción 4**, en este nivel, la tasa de crecimiento está limitada por una baja disponibilidad de nutrientes minerales en especial por el fósforo. Situación que se da en zonas agrícolas altamente explotadas, y donde el uso de fertilizantes es escaso o casi nulo (Penning de Vries *et al.*, 1989).

## **2.12. Modelos de simulación**

### **2.12.1. Definición**

Bermúdez (1994) define a la simulación como el proceso de diseñar un modelo de un sistema natural y conducir experimentos con el modelado. Gate (1995) añade que para un cultivo la simulación es la representación relativamente simple de éste, empleado para estudiar el crecimiento, además para entender situaciones complejas y para hacer previsión de las respuestas de crecimiento al medio ambiente.

### **2.12.2. Aplicación de los modelos de simulación**

Para Beukema y van der Zaag (1990), un modelo es la representación de los conocimientos adquiridos. Por tanto, se considera una herramienta que permite predecir el comportamiento de un cultivo en medios donde nunca ha sido cultivado, y sin mayor esfuerzo que la recolección de información específica del lugar.

Pueden ser empleados tanto para el aprendizaje y la enseñanza del comportamiento de un cultivo en diferentes situaciones. Para estimar el rendimiento se puede determinar la producción potencial, la producción restringida por algún factor limitante, también se puede simular el efecto de las densidades de siembra, épocas de fertilización, láminas y frecuencias de riego, diseñar programas de aplicación de pesticidas y otras prácticas de manejo (Penning de Vries *et al.*, 1989).

### **2.12.3. Limitaciones de los modelos de simulación**

Cualquier modelo, y ciertamente los esquemas computarizados más avanzados, no dejan de ser representaciones simplificadas del mundo real, por lo que los resultados obtenidos deben ser siempre examinados con criterio, y a la luz de la experiencia y la práctica, así como de los resultados experimentales obtenidos en campo (de Wit, 1986).

Catacora (1996) señala que las limitaciones de la simulación son: principalmente el costo en tiempo y dinero que supone el desarrollo de un modelo, el riesgo de errores según un mayor o menor grado de sensibilidad, y la atribución de injustificada validez a resultados puramente numéricos.

### **2.12.4. Tipos de modelos**

#### **2.12.4.1. Modelos descriptivos**

Catacora (1996) cita a Penning de Vries, y describe de manera simple el comportamiento de un sistema en particular. Generalmente se sabe poco o nada sobre los mecanismos que influyen en dicho comportamiento, la descripción se realiza por medio de ecuaciones matemáticas, un claro ejemplo de estas ecuaciones es aquella que se obtiene de sucesivas mediciones de biomasa acumulada de un cultivo.

#### **2.12.4.2. Modelos dinámicos**

Ríos (1996) indica que un modelo es dinámico cuando simula el funcionamiento de un sistema en particular a través del tiempo. Las variables de estado empleados pueden ser cuantitativas (peso, altura), o cualitativas (estadios de desarrollo), por tanto los modelos dinámicos al realizar simulaciones de crecimiento integran periodos de tiempo corto (generalmente un día) con su tasa de crecimiento.

Ríos (1996) cita a Evans, y menciona que para un modelo dinámico es necesario disponer de información sobre las tasas de crecimiento potencial de las plantas y sus órganos.

#### 2.12.4.3. Modelos explicativos

Un modelo explicativo realiza la descripción de los mecanismos y procesos fisiológicos de la planta (fotosíntesis, expansión foliar, inducción a la formación de brotes), además de integrar estos procesos con el factor climático (temperatura y radiación solar). Consecuentemente la cuantificación del crecimiento será resultado de la interacción de ambos factores (ambiental y factores del propio cultivo) (Penning de Vries *et al.*, 1989).

#### 12.5. Clasificación de los modelos explicativos según su nivel de complejidad

Kooman (1995) menciona que la complejidad de los modelos de simulación puede elaborarse en tres niveles, y dependerá de la profundidad y detalle de los fenómenos involucrados. Básicamente el crecimiento es el resultado de la cantidad de luz incidente, la cantidad de luz interceptada y la eficiencia de su uso, la producción así como el rendimiento depende además del índice del cultivo. Estos componentes pueden desglosarse en subcomponentes incrementando la complejidad del modelo pero no su precisión (cuadro 2).

**Cuadro 2. Caracterización de los modelos según el grado de complejidad y detalle (Kooman, 1995).**

	<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>	<b>Nivel 3</b>
Intercepción luz	Fracional (según el est. Desarrollo)	En base a IAF	En base a IAF y Coef. de extinción
Uso de luz	Eficiencia IC	Eficiencia Patrón asignación	Fotosíntesis y respiración Patrón asignación

#### 2.12.6. Organización general de un modelo

De acuerdo a Gate (1995), la mayoría de los modelos de simulación de funcionamiento de un cultivo están generalmente organizados en cuatro módulos:

**Primer Módulo fenológico**, este rinde cuenta de la cronología de la aparición de los estadios de desarrollo, las variables para el funcionamiento de este módulo son de orden climático (temperatura y duración del día) y varietal (necesidades en vernalización y fotoperiodo).

**Segundo Módulo de producción de biomasa**, también denominado módulo de crecimiento, aquí intervienen los fenómenos biológicos ligados a la fotosíntesis; interceptación de la radiación solar por el índice de área foliar y la transformación de la luz interceptada en materia vegetal.

**Tercer Módulo de aparición y redistribución de biomasa**, está regido por las necesidades de crecimiento de los diferentes órganos, establecidas por el módulo fenológico.

**Cuarto módulo de factores limitantes**, intervienen en la modificación de las principales funciones del modelo de crecimiento con efectos diferentes según los estadios de desarrollo, por lo general los factores limitantes son térmicos, hídricos, nutricionales y fitosanitarios.

#### **2.12.7. Modelo WOFOST**

van Diepen *et al.* (1988) señalan que el modelo de simulación explicativo WOFOST (versión 4.1), fue desarrollado en el Centro Estudios de Alimentos del Mundo (CWFS). Este modelo permite simular el crecimiento y desarrollo de varios cultivos, integrando las características agrofisiológicas de un cultivo con las características climáticas y edafológicas de un determinado lugar.

Este modelo puede ser considerado como una herramienta para analizar los aspectos bio-físicos de la producción de cultivos anuales bajo tres sistemas teóricos de producción jerárquicamente ordenados según los factores limitantes al crecimiento: potencial, con restricción hídrica y con restricción nutricional (van Diepen *et al.*, 1988). Gate (1995) señala que el uso del modelo WOFOST, ayudará a definir el comportamiento de un cultivo bajo condiciones óptimas.

WOFOST se basa en el principio de una determinada área foliar que intercepta la radiación solar, luego la asimilación de carbohidratos destinado al mantenimiento de las funciones fisiológicas o respiración de mantenimiento y otra parte a la conformación estructural de los diferentes órganos vegetales, según una tasa de repartición establecida en base a la fenología del cultivo. (Bermúdez, 1994; van Diepen *et al.*, 1988). La figura 2 muestra un esquema simplificado de los procesos fisiológicos diarios considerados por WOFOST.

#### **2.12.8. Estructura del modelo WOFOST**

El modelo WOFOST consta de un programa principal, WMAIN41.FOR, el cual organiza la ejecución del modelo, permitiendo al investigador elegir la modalidad de trabajo y definir los parámetros para la modelación. También contiene la subrutina APPLE, la cual produce la simulación propiamente dicha, puesto que es básicamente el modelo de crecimiento.

La simulación se verifica desde la emergencia hasta la madurez con intervalos de tiempo de un día. Así mismo, la simulación del crecimiento de un cultivo requiere de cinco archivos de información, los que contienen los datos sobre los cuales opera el modelo: SOIL41.DAT, CROP41.DAT, CLIM41.DAT, REALRD41.DAT y MENU.DAT. (van Diepen *et al.*, 1988). Los parámetros de clima y suelo considerados por el modelo se resumen en el cuadro 3.

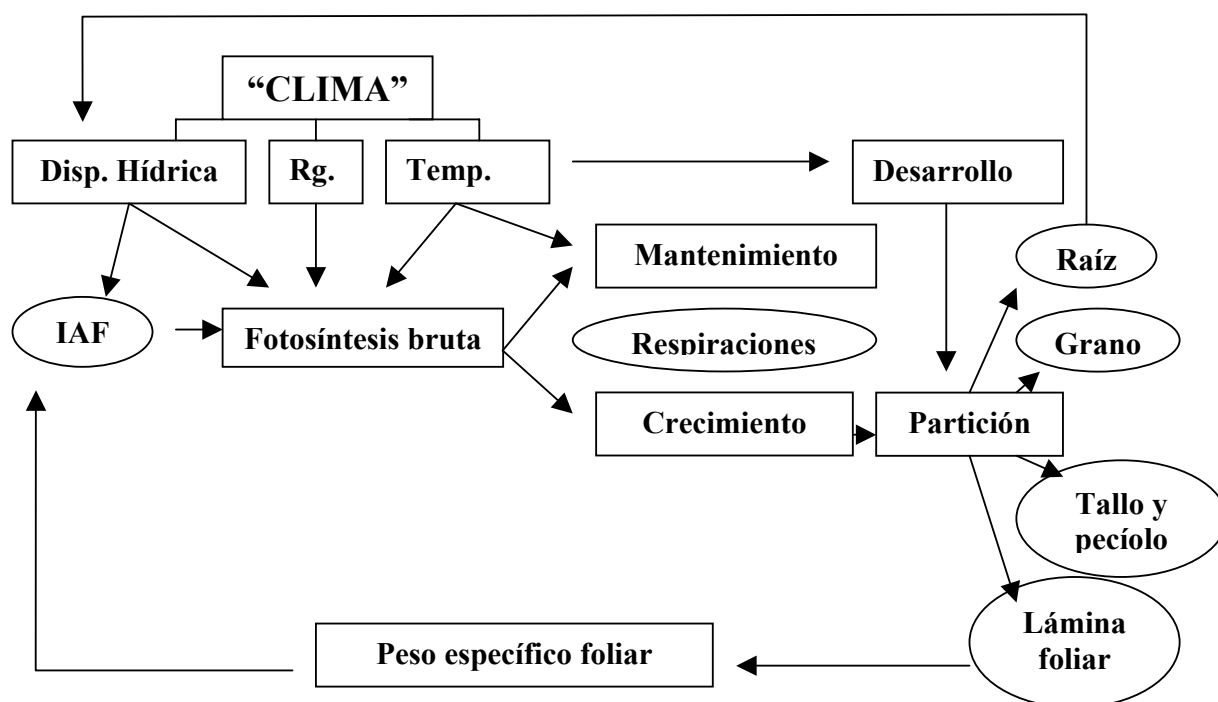


Figura 2. Esquema simplificado de los procesos fisiológicos diarios considerados por WOFOST.

Cuadro 3. Características de suelo y clima que considera el modelo WOFOST (adaptado de Bermúdez, 1994).

FACTORES	VARIABLES
<b>SUELO:</b>	Nombre Textural Velocidad de Infiltración Contenido volumétrico de agua versus - potencial hídrico
<b>CLIMA:</b>	Nombre del lugar Latitud Altitud Temperatura máxima mensual Temperatura mínima mensual Radiación solar mensual Humedad relativa mensual Velocidad del viento mensual Precipitación mensual Promedio mensual de días de lluvia A, B; coeficientes utilizados en la fórmula de - Angstrom para calcular la evapotranspiración

Fuente: van Diepen *et al.*, (1988)



### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Características de la zona**

##### **3.1.1. Localización**

El ensayo se estableció en la Estación Experimental de Choquenaira dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés. Políticamente se encuentra en el Altiplano Central, pertenece a la jurisdicción de la primera sección de la provincia Ingávi, del municipio de Viacha departamento de La Paz. Se encuentra a 3858 m.s.n.m., a 32 Km. Sud – Oeste de la Ciudad de La Paz, geográficamente se encuentra entre los paralelos 16°41'0'' y 16°43'30'' de latitud sur y 68°15'54'' y 68°18'05'' de Longitud oeste, limita al norte y oeste con los terrenos de Radio San Gabriel y colina Huacullani, al sur con la comunidad Choquenaira y al este con el río Jacha Jahuira (Anexo 1)

##### **3.1.2. Características Edafoclimáticas**

###### **3.1.2.1. Fisiografía**

Los terrenos de la estación presentan fluctuaciones de serranía, ladera y mayormente plana, donde se distinguen dos grandes paisajes; aluvial no inundable y aluvial inundable, este último ocupa una mayor superficie de los terrenos de la estación.

###### **3.1.2.2. Clima**

Holdridge (1982) clasifica a la zona como clima templado frío. Respecto a los principales indicadores climáticos, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) indica que la zona presenta una precipitación anual de 619 mm, el 80% de la precipitación se concentra entre los meses de noviembre a marzo, la humedad relativa anual es del 57%, una temperatura media anual de 7.1°C y una máxima promedio de 16°C y una mínima promedio de 3°C a 4°C (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Promedios mensuales climáticos de la zona de Choquenaira registrados durante 20 años**

Datos Climáticos	M E S											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precip. (mm) Prom.	131,4	97,3	66,3	38,4	15,6	2,6	6,3	15,2	33,4	35,4	53,4	92,8
Hum. Relativa (%)	64	61	62	53	46	49	42	44	43	47	47	50
Temperatura (°C)	9,8	10,3	10	8,7	6,1	3,8	3,8	5,4	7,6	9,3	10,4	10,5
Días con precip.	19	16	14	7	3	1	1	3	6	8	10	15
Días con helada	1	1	3	13	27	29	30	28	20	12	7	2

Fuente: SENAMHI, (2000)

### 3.1.2.3. Suelo

Orsag (1989) indica que los suelos de la estación son de origen fluvio lacustre aluviales y coluviales. La profundidad efectiva es de 25 a 35 cm, una profundidad máxima de 2.6 m. La textura es franca arena arcillosa.

Callizaya (1994) menciona que los suelos de la estación presentan características físico-químicas moderadas a bajas. La fertilidad natural, con bajos contenidos de fósforo (P); altos a muy bajos en potasio (K); el calcio (Ca) en alta proporción en la parte superficial y muy altos en el subyacente, el magnesio (Mg) es bajo en el suelo y subsuelo, la materia orgánica presenta niveles bajos a muy bajos. Considerados aptos para todo tipo de cultivo (Anexo 2, cuadro 1).

### 3.1.2.4. Vegetación

Holdridge (1982) clasifica a la zona como montano estepa a estepa espinosa, habitada principalmente por especies arbustivas, herbáceas y plantas anuales. Las especies arbustivas y plantas cultivables son mencionadas en el Anexo 3, cuadro 2.

## 3.2. MATERIALES

### 3.2.1. Materiales y equipos de campo

Se emplearon: tractor con implementos de arado rastreado y subsolado, picos, palas, azadones, rastrillos, carretilla, muestreador de suelos, cilindro, cuchillo, tijeras, estacas de madera, cinta métrica (50 m), flexómetro (5 m), mochila de aspersión,

sacos de yute y de algodón, placas de madera (0.50 x 0.10 m), cámara fotográfica, estación meteorológica, botellas de plástico, cuaderno de campo.

### **3.2.2. Materiales de laboratorio**

Se utilizaron: horno de desecación, balanzas analíticas (0.01 g), canastillas de plástico, bandejas de aluminio, venesta con área de (0.40 x 0.50 m), tijeras, cuchillos, sobres de papel, hojas de cartulina, cámara fotográfica con trípode, tamizadores (1.4 a 2.5 mm), tablas de identificación de (0.10 x 0.25), flexómetro y herborizadores.

### **3.2.3. Material químico**

Los productos químicos empleados fueron los fertilizantes 18 – 46 – 0 (fosfato diamónico), 46 – 0 - 0 (urea), y ridomil un fungicida para el control fitosanitario.

### **3.2.4. Material de gabinete**

Para el trabajo de gabinete se emplearon los siguientes materiales: planilla de registros, paquete estadístico, programa SIGMASCAN PRO 5, programa Adobe, cámara fotográfica digital, programa de modelo de simulación de cultivo WOFOST ver 4.1.

### **3.2.5. Material biológico**

Se utilizaron tres variedades de quinua; Blanca de Yanamuyu, Surumi y Forrajera (línea 364).

## **3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **3.3.1. Preparación del terreno y distribución de parcelas experimentales**

El terreno se preparó a principios del mes de septiembre mediante labores de arado y rastra, quedando la parcela en barbecho hasta la época de siembra. Se delimitaron 16 unidades experimentales de 11m x 6m, cada una con una superficie útil de 66 m<sup>2</sup>,

cada unidad tuvo 16 surcos (agrupados de 4 en 4), con 6 m de largo y 0.5 m de ancho y 1 m de pasillo entre cada 4 surcos. La superficie total fue 1056 m<sup>2</sup>.

### **3.3.2. Distribución de tratamientos, diseño experimental**

Para la distribución de tratamientos, se empleó el diseño monofactorial con bloques al azar. Se tuvo 4 niveles y cada uno con 4 repeticiones, por lo tanto se tuvieron 16 unidades experimentales, de las cuales 8 estuvieron sometidas a fertilización y las 8 restantes estuvieron bajo condiciones naturales. Se tuvieron cuatro tratamientos: el primer y segundo tratamiento correspondían a la variedad Blanca de Yanamuyu (**T1**) y a la variedad Surumi (**T2**) que fueron sometidas a condiciones naturales, el tercero correspondía a la misma variedad Surumi (**T3**) y el cuarto a la variedad Forrajera (**T4**) estos últimos estuvieron bajo fertilización nitrogenada.

### **3.3.3. Labores culturales**

#### **3.3.3.1. Fertilización química**

La fertilización mineral adoptada se realizó a 8 unidades con manejo intervenido, 222 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante 18 – 46 – 0 (40 kg ha<sup>-1</sup> de N y 44.5 kg ha<sup>-1</sup> de P) y 120 kg ha<sup>-1</sup> de urea (56 kg ha<sup>-1</sup> de N). La aplicación de urea se realizó en dos etapas, la primera aplicación se realizó al momento de la siembra y la segunda se efectuó juntamente con la segunda labor de desmalezado (15<sup>ava</sup> semana después de la siembra), con el objetivo de evitar las pérdidas de nitrógeno por lixiviación y volatilización a causa de las altas temperaturas. Por otro lado el fosfato diamónico se aplicó al momento de la siembra.

#### **3.3.3.2. Siembra**

La apertura de surcos se realizó manualmente con espaciamientos de 0.5 m entre surcos, el sistema de siembra que se empleó fue el de chorro continuo. Se pretendió lograr una mayor cobertura del suelo para una mejor intercepción de la radiación solar incidente por unidad de superficie cultivada, mediante la implementación de una mayor densidad de siembra, entonces se decidió utilizar para la variedad Surumi

10 kg ha<sup>-1</sup> (colocando 2.2 g en 6 metros lineales) y, para la variedad local y forrajera se utilizó una densidad de 8 kg ha<sup>-1</sup> (colocando 1.3 g en 6 metros lineales), con espaciamiento de 0.5 m entre surcos.

Antes de la siembra se realizó un riego localizado a todos los surcos de las unidades experimentales, con un promedio de 5 litros por metro lineal.

#### **3.3.3.3. Aporques y desmalezados**

El aporque y el control de malezas se realizaron de acuerdo a los siguientes factores: a la incidencia de las malezas, a la fase del cultivo y a las condiciones ambientales desfavorables, así como el granizo que se presentó a los 83 días después de la siembra, y a la fase vegetativa que se encontraba el cultivo, influyeron en la decisión de realizar el primer aporque y desmalezado a los 85 dds, posteriormente el segundo aporque y desmalezado se realizaron a los 98 dds (antes de la floración) juntamente con la fertilización nitrogenada.

#### **3.3.3.4. Tratamientos fitosanitarios**

El control fitosanitario para el mildiu (*Peronospora farinosa*), se realizó con ridomil, producto químico específico para esta enfermedad.

#### **3.3.3.5. Cosecha**

La cosecha se realizó manualmente, cortando todas las plantas presentes dentro del segmento, luego del corte se llevaron al laboratorio para realizar el pesaje de las muestras, posteriormente se separaron las panojas del resto de la planta y se pesaron independientemente; se colocaron al horno de desecación durante 48 horas a 65°C hasta tener un peso constante, posteriormente se procedió a realizar la trilla de forma manual, para la limpieza de los granos se emplearon tamizadores de 1.4 a 2.5 mm, el grano limpio se pesó y envasó en sobres, colocando sus respectivos códigos.

### **3.3.4. Evaluación y toma de datos**

#### **3.3.4.1. Mapeo de vigor de las plantas**

Se efectuó un mapeo a los 65 días después de la siembra en todas las unidades experimentales, revisando cada surco y calificando el vigor de recubrimiento, la homogeneidad y la cobertura del dosel. Este mapeo permitió definir lugares de evaluación.

#### **3.3.4.2. Planificación de muestreos**

Luego de evaluar y clasificar en grupos a los segmentos evaluados, se determinó realizar muestreos quincenales, por lo tanto se decidió realizar 4 a 5 muestreos durante el ciclo del cultivo. Cada muestreo destructivo o cosecha periódica correspondía a una línea determinada, denominada segmento de surco que correspondió a 0.50 m lineales, el mismo que estuvo en función al mapeo calificativo de vigor.

La toma de muestras se realizó en las áreas con homogeneidad de condiciones. Se realizó muestreos de 40 segmentos por fecha y 10 segmentos por tratamiento, por lo que cada fecha de muestreo se transformó en número de días después de la siembra (**DDS**).

### **3.3.5. Evaluaciones destructivas**

#### **3.3.5.1. Número de plantas del segmento**

En cada fecha de muestreo y para cada segmento se cortaron y registraron el número de plantas (**# pl.** del segmento)

#### **3.3.5.2. Altura de la planta**

La altura de la planta se determinó al mismo tiempo de realizar el muestreo del segmento, también se determinó la altura (en metros) de cada una de las plantas, de

esta manera se obtuvo una altura promedio por fecha de muestreo y por tratamiento (**alt.** m del segmento).

### 3.3.5.3. Biomasa materia seca aérea

Se cortaron las plantas comprendidas dentro del segmento, se procedió a pesar el material vegetal fresco (*toff*). Se separaron en sus diferentes órganos, luego se realizó submuestreos representativos de cada órgano como ser: inflorescencia (*inf*), tallo (*tal*) y lámina foliar (*fol*), se procedió al pesaje de los órganos frescos del submuestreo (*inff*, *talf* y *folf*). Para secarlos se pusieron a la estufa durante 48 horas a 65°C hasta obtener un peso constante. Posteriormente se procedió a pesar los órganos secos del submuestreo (*infs*, *tals* y *fols*). Luego se calculó la materia seca total (***msa***) del segmento muestreado con la siguiente ecuación:

$$msa = inf + tal + fol$$

Donde:

*msa* = materia seca aérea del segmento

*inf* = peso seco de inflorescencia del segmento

*tal* = peso seco de tallo del segmento

*fol* = peso seco de láminas foliares del segmento

### 3.3.6. Variables de respuesta

#### 3.3.6.1. Volumen

El volumen se determinó en función al número de plantas presentes por metro cuadrado y a la altura promedio del segmento, obteniendo la siguiente ecuación:

$$Volumen = \# PL / m^2 * alt (m)$$

Donde:

*#PL* = número de plantas en un metro cuadrado

*#PL*, es el resultado del producto del número de plantas del segmento (*#pl* \*4)

*alt* = altura promedio del segmento

1 segmento muestreado represento a una superficie de 0.25 m<sup>2</sup>, se multiplico por 4 para tener variables por metro cuadrado (m<sup>2</sup>).

### 3.3.6.2. Materia seca total por órgano y por metro cuadrado

La materia seca por metro cuadrado de cada uno de los órganos, fueron obtenidas mediante las siguientes ecuaciones:

$$FOL = fol * 4$$

$$TAL = tal * 4$$

$$INF = inf * 4$$

Donde:

*FOL* = materia seca foliar por metro cuadrado

*fol* = materia seca foliar del segmento

*TAL* = materia seca del tallo por metro cuadrado

*tal* = materia seca del tallo del segmento

*INF* = materia seca de la inflorescencia por metro cuadrado

*inf* = materia seca de la inflorescencia del segmento

Posteriormente se determinó la materia seca aérea total por metro cuadrado mediante la siguiente ecuación:

$$MSA = INF + TAL + FOL (g . m^{-2})$$

Donde:

*MSA* = materia seca total en un metro cuadrado

*INF* = materia seca de la inflorescencia en un metro cuadrado

*TAL* = materia seca del tallo en un metro cuadrado

*FOL* = materia seca foliar por metro cuadrado

### 3.3.6.3. Área foliar (afol) y peso foliar por submuestra (fols)

De cada uno de los segmentos muestreados se sacaron cinco submuestras al azar de las hojas vivas. Luego de pesar las submuestras se registro el peso fresco de láminas foliares (folf). Inmediatamente se herborizó y se llevo a estufa durante 48



horas a 65°C hasta obtener un peso constante, luego se registro el peso seco foliar de esta submuestra (fols).

Secas las láminas foliares se expandieron sobre cartulina con fondo celeste, se colocó en la base de la cartulina una venesta con área de 25000 mm<sup>2</sup>, colocando su respectivo código. Posteriormente se colocó la cámara fotográfica sobre un pequeño listón y sobre este un pequeño nivel, se procedió a tomar fotografías de las imágenes de las láminas foliares y almacenarlas en la computadora para su posterior análisis.

Las fotografías fueron llevadas al programa CAMEDIA MASTER 2.5, y luego analizadas mediante el paquete SIGMA SCAN PRO5.0, registrándose con dos tonos de color: tono oscuro para las hojas y tono claro para el fondo celeste. Se hicieron correcciones de algunas imágenes por problemas de reflejos, luego se determinó el porcentaje de cobertura de las hojas en relación al área de referencia.

#### **3.3.6.4. Peso específico foliar (PEF)**

El peso específico foliar se determinó con la relación peso foliar con área foliar, ambos obtenidos en el mismo submuestreo (g.m<sup>-2</sup>).

#### **3.3.6.5. Índice de área foliar (IAF)**

El índice de área foliar se determinó con la relación peso seco de láminas foliares por metro cuadrado y el peso específico foliar, a través de la siguiente relación:

$$IAF = FOL * \frac{fols}{afol} \left( \frac{g.m^{-2}}{g.m^{-2}} \right)$$

Donde:

*IAF* = índice de área foliar

*FOL* = peso seco total de laminas foliares en un metro cuadrado

*fols* = peso seco de laminas foliares de una sub muestra

*afol* = área de láminas foliares de la sub muestra

La relación *fols/afol* es el peso específico foliar de la sub muestra

### 3.3.6.6. Peso de grano (GRA)

El peso de los granos del segmento, se determinó una vez obtenida los granos limpios, posteriormente se transformó en peso de granos por metro cuadrado mediante la siguiente fórmula:

$$GRA = gra * 4(g.m^{-2})$$

Donde:

*gra* = peso seco de grano del segmento muestreado

*GRA* = peso seco de grano en un metro cuadrado

### 3.3.6.7. Índice de Cosecha (IC)

Se realizó la relación peso seco de grano sobre la materia seca aérea total.

$$IC = \frac{GRA}{MSA} \left( \frac{g.m^{-2}}{g.m^{-2}} \right) * 100$$

Donde:

*IC* = relación del índice de cosecha

*GRA* = peso seco de grano por metro cuadrado (g.m<sup>-2</sup>)

*MSA* = materia seca aérea por metro cuadrado (g.m<sup>-2</sup>)

### 3.3.7. Procedimiento estadístico

#### 3.3.7.1. Ajuste de la evolución por medio de polinomios de orden primero, segundo o tercero.

#### Evolución del índice de área foliar (IAF/DDS)

Para establecer la relación, se confrontaron IAF con DDS para cada tratamiento y para cada fecha.

### **Relación de materia seca aérea y volumen (MSA/VOLUMEN)**

Para establecer la correspondiente relación se establecieron los coeficientes de correlación entre MSA y VOLUMEN para cada tratamiento y para cada fecha de muestreo.

### **Evolución del peso específico foliar (PEF/DDS)**

Para conocer la evolución del PEF se realizó comparaciones de promedios entre las diferentes fechas evaluadas, para cada tratamiento y entre tratamientos.

### **Relación hoja, tallo (FOL/TAL)**

Se establecieron las regresión entre la relación (FOL/TAL) y los días después de la siembra (DDS) para cada tratamiento.

### **Relación de la inflorescencia, materia seca aérea (INF/MSA)**

Se establecieron regresiones entre la relación Inflorescencia y materia seca aérea en función a los días después de la siembra (DDS) para cada tratamiento.

### **3.3.7.2. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar (MSA/IAF)**

Se calculó, por tratamiento y por fecha de muestreo, las ecuaciones de regresión lineal de la MSA en función del IAF, con su coeficiente de determinación correspondiente, el grado de significancia en relación a los grados de libertad respectivos, y los intervalos de confianza de la pendiente y de la abscisa al origen (Tomassone *et al.*, 1993).

$$MSA = a + b * IAF$$

$$y = a + bx$$

Estimación de la ordenada al origen:

$$\hat{a} = \frac{(\sum y * \sum x^2 - \sum xy * \sum x)}{\Delta}$$

Estimación de la pendiente:

$$\hat{b} = \frac{(-\sum y * \sum x + \sum xy * n)}{\Delta}$$

Estimación del parámetro delta:

$$\Delta = n * \sum x^2 - (\sum x)^2$$

Cálculos de los residuos de la regresión:  $resi = (y_{obs} - y_{est})$

Suma de residuos al cuadrado:  $\sum resi^2 = \sum (y_{obs} - y_{est})^2$

Varianza de los residuos:  $s^2 = \frac{\sum resi^2}{(n - 2)}$

Desviación estándar de los residuos:

$$s_a = \text{raíz cuadrado} \left[ \frac{(s^2 * \sum x^2) / (n * \sum x^2 - (\sum y)^2)}{n} \right]$$

$$s_b = \text{raíz cuadrado} \left[ \frac{(s^2 * n) / (n * \sum x^2 - (\sum x)^2)}{n} \right]$$

Intervalo de confianza de  $a$  y  $b$  al nivel de 95%

$$a = \hat{a} \pm t_{5\%, n-2} * s_a$$

$$b = \hat{b} \pm t_{5\%, n-2} * s_b$$

$t_{5\%, n-2}$  = Valor del  $t$  Student con la probabilidad de 95% y con  $(n - 2)$  grados de libertad.

Conociendo la relación lineal negativa y significativa entre  $a$  y  $b$ , se puede establecer la zona de confianza de  $a$  y  $b$  al graficar el segmento que une los puntos  $(b + t * S_b, a - S_a)$  y  $(b - t * S_b, a + S_a)$  en el sistema cartesiano con  $b$  en las abscisas y  $a$  en las ordenadas.

### 3.3.7.3. Comparación de la relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar (MSA/IAF) observado, con los resultados obtenidos mediante simulación

Se efectuaron simulaciones con el modelo de cultivo WOFOST, tomando en cuenta las condiciones térmicas y radiativas de la campaña y los parámetros fisiológicos mencionados por Germain (2004), haciendo variar la materia seca del cultivo al inicio de la emergencia de 2 a 7 kg ha<sup>-1</sup>. Se consideró los datos de IAF y de MSA simulados a las diferentes fechas de muestreo, es decir a los 70, 90, 110, 130 y 170 dds, para establecer las respectivas regresiones lineales de la MSA en función del IAF.

Posteriormente, se modificaron los parámetros fisiológicos de eficiencia de la fotosíntesis, al nivel de una lámina foliar individual y al nivel del dosel. También se modificaron los parámetros de eficiencia de la fotosíntesis en relación a la temperatura.

Se establecieron relaciones entre los coeficientes de regresión  $a$  y  $b$ , de las ecuaciones de la relación materia seca aérea e índice de área foliar (MSA/IAF) observados, para comparar con los coeficientes de las ecuaciones de la relación (MSA/IAF) obtenidas mediante simulación.

### **3.3.8. Simulaciones con el modelo estándar WOFOST para la relación del crecimiento con el IAF**

Las simulaciones que proporcionó los datos de crecimiento de una quinua virtual utilizó los parámetros climáticos (Cuadro 5) y fisiológicos mencionados por Germain (2004) (Cuadro 6). Se hizo unas primeras simulaciones con los valores estándar de los parámetros y con un rango de 0.2 a 0.8 g.m<sup>-2</sup> de materia seca a la emergencia.

Se hizo una segunda serie de simulaciones, haciendo variar a la vez el peso específico foliar y la eficiencia de asimilación de CO<sub>2</sub> de las hojas a saturación de luz (Unidades: kg CO<sub>2</sub> por ha de área foliar y por hora). Estas simulaciones no cambiaron significativamente las ecuaciones lineales que relacionan, a una fecha dada, la MSA con el IAF.

También se hizo simulaciones complementarias para comprobar el efecto de un cambio de la temperatura base y temperatura óptima de crecimiento y el efecto de un cambio en el coeficiente de extinción.

**Cuadro 5. Condiciones climáticas consideradas (*Rg*: radiación global; *Ea*: tensión de vapor de agua; *v*: velocidad del viento; *pp*: precipitación mensual; *#días* lluvias: número de días con lluvia) (promedio de 5 años, observaciones de (Germain 2003).**

meses	Tmin	Tmax	Rg	Ea	v	pp	#días
	(°C)	(°C)	(MJ <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	(hPa)	(ms <sup>-1</sup> )	(mm)	lluvias
octubre	0,7	17,4	20,6	5,6	2,1	40	7
noviembre	2,4	17,0	20,5	6,5	2,3	50	8
diciembre	3,7	17,2	19,4	7,5	2,3	90	12
enero	4,3	15,5	17,6	8,0	2,1	130	15
febrero	3,5	16,2	19,9	7,5	2,0	100	12
marzo	2,8	16,2	17,9	7,0	1,8	80	10
abril	0,7	16,2	17,3	7,0	1,8	30	6

Fuente: Germain, (2003)

**Cuadro 6. Parámetros fisiológicos utilizados por el modelo, para una quinua (WOFOST) en condiciones de Viacha.**

Parámetros fisiológicos	Valor estandar	Unidad	Valor cambiado
Masa al inicio	0,5	g.m <sup>-2</sup>	0,2
	0,5		0,8
Peso específico foliar	66	g.m <sup>-2</sup>	83
eficiencia inicial de asimilacion de CO <sub>2</sub>	40	kg.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	50
Coeficiente de extinción	0,75		0,82
Temp.base crecimiento	4	°Cd	2
Temp. óptima crecimiento	20	°Cd	18

Fuente: Germain, (2004)

Los resultados obtenidos de la simulación de la relación entre MSA en función al IAF (mencionados en el Anexo 7, cuadro 1) fueron proporcionados por Germain (2004). Estas ecuaciones lineales de la MSA en función al IAF, fueron muy altamente significativos ( $R^2 = 0.99$ ;  $P \leq 0.001$ ) (Cuadro 7).

**Cuadro 7. Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, según la ecuación teórica obtenida mediante simulación estándar.**

Parámetros de regresión	Fechas de evaluación (DDS)			
	70	90	110	130
R <sup>2</sup>	0,99	0,99	0,99	0,99
<i>a</i>	1,8	8,9	27	32,5
<i>b</i>	125,7	172,3	247	391,2
Nivel de $\alpha\%$	0,01	0,01	0,01	0,01

La segunda serie de simulaciones proporcionaron las siguientes ecuaciones de regresión de la MSA en función del IAF para las siguientes fechas:

$$(70\text{dds}) \rightarrow MSA = 158 * IAF + 6$$

$$(90\text{dds}) \rightarrow MSA = 209 * IAF + 34$$

$$(110\text{dds}) \rightarrow MSA = 282 * IAF + 97$$

$$(130\text{dds}) \rightarrow MSA = 459 * IAF + 27$$

$$(170\text{dds}) \rightarrow MSA = 1709 * IAF - 309$$

Las simulaciones con cambio de los parámetros de temperatura o de coeficiente de extinción cambiaron los valores obtenidos, pero las ecuaciones no cambiaron significativamente.

Las pendientes de estas nuevas ecuaciones mostraron pendientes similares a las variedades Surumi y Blanca en sus dos primeras evaluaciones. Las simulaciones no permitían explicar la superioridad de las pendientes en el caso de la variedad Blanca en las dos últimas evaluaciones.

## 4. RESULTADOS

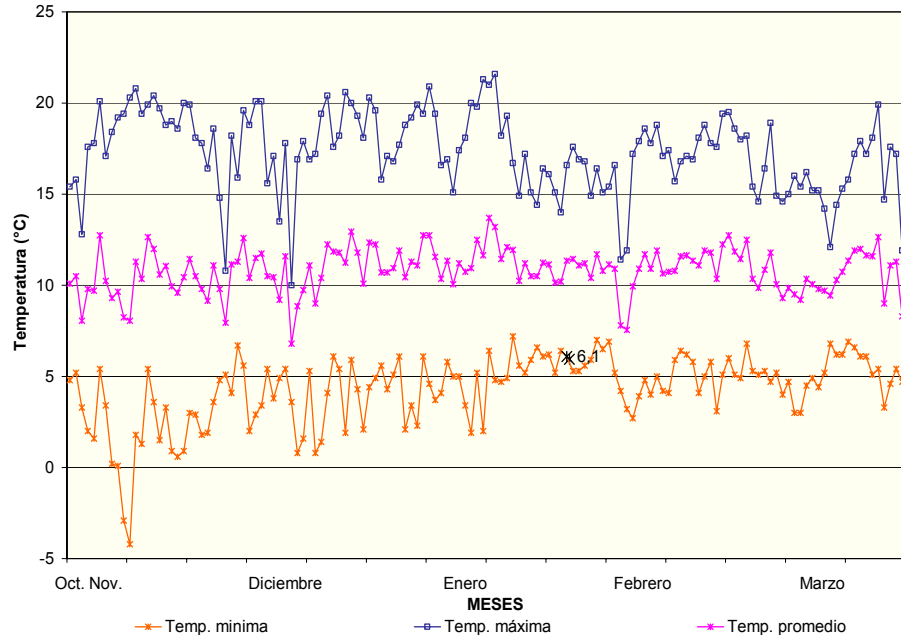
### 4.1. Desarrollo de la campaña agrícola

#### 4.1.1. Condiciones climáticas

##### 4.1.1.1. Temperatura

Las temperaturas máximas diarias presentaron variaciones de 21.6°C a 10°C (Gráfico 3), sin embargo los promedios mensuales fueron más homogéneos, 18°C para noviembre y diciembre y 17°C para febrero. La temperatura máxima diaria fue 21.6°C registrado el 7 de enero, que correspondió a 80 días después de realizada la siembra.

Respecto a las temperaturas mínimas, los promedios mensuales se incrementaron a partir del mes de noviembre de 2.4°C hasta 5.3°C para el mes de enero, luego descendió a 4.9°C en febrero.



**Gráfico 3. Variación de las temperaturas máximas y mínimas diarias Registradas durante el periodo de ensayo**

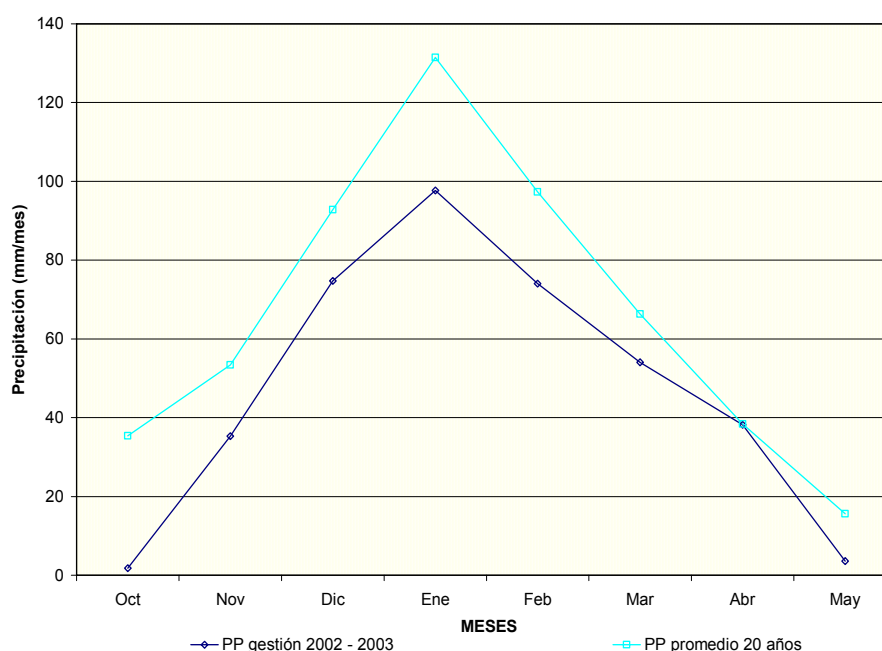
Sin embargo, se registraron temperaturas bajo 0°C. Al inicio de la emergencia, se registro una temperatura de -4.2°C que no tuvo ningún efecto, debido a que la



intensidad fue corta, asimismo se presentaron temperaturas inferiores a  $-5^{\circ}\text{C}$  al final del ciclo del cultivo, que no causaron daños a los tratamientos T1, T2 y T3, pero si causo daños en el T4 por que este tratamiento estuvo en fase de grano lechoso, fase en que es bastante sensible a las bajas temperaturas, este factor aceleró la madurez y en casos extremos detuvo la madurez de los granos, que influyeron en el rendimiento final de dicho tratamiento

#### 4.1.1.2. Precipitación

La precipitación tuvo un comportamiento similar a una distribución normal durante la campaña agrícola, pero inferior a las precipitaciones medias históricas de 20 años para los mismos meses (cuadro 4). Para el mes de octubre la precipitación fue de 1.8 mm, y el promedio general para este mes fue de 35.4 mm, presentando un déficit de 33.6 mm (Gráfico 4).



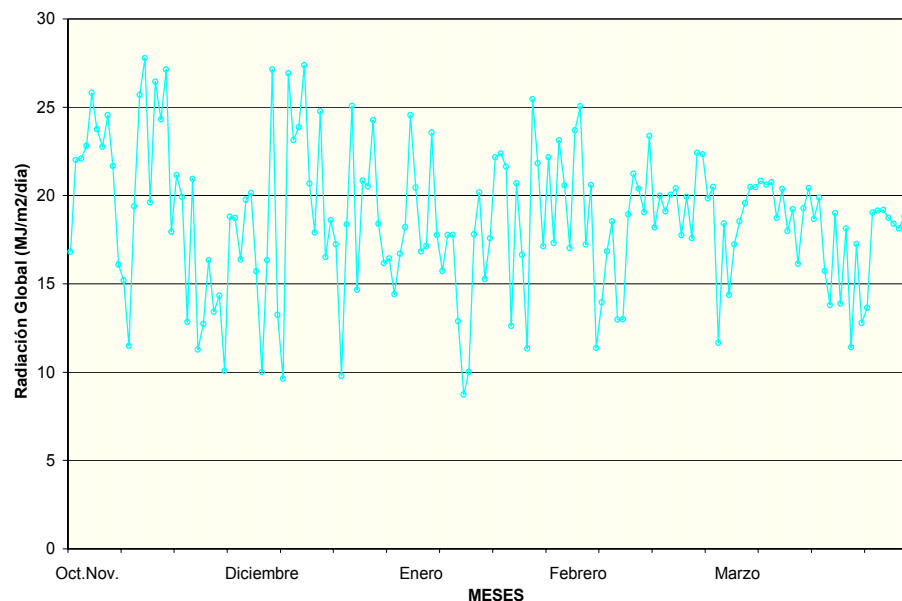
**Gráfico 4. Distribución de la precipitación mensual (mm) registrada durante el periodo de ensayo y el promedio de 20 años.**

La falta de precipitación durante los primeros 20 días después de la siembra fue determinante en la emergencia, provocando variaciones en la emergencia de las plántulas en parcelas de los tratamientos de Surumi (T2, T3) y Forrajera (T4).

Finalmente la precipitación acumulada durante el ensayo fue de 379 mm, y el promedio de 20 años fue de 531 mm, reportando un déficit total de 152 mm, a pesar de este déficit no hubo sequía severa excepto para los primeros 20 días del mes de noviembre. También se presentó una granizada intensa el 21 de enero, a los 83 días después de la siembra.

#### 4.1.1.3. Radiación global

Se presentó un perfil radiativo homogéneo durante el ensayo, con un desvío estándar de 5.1 y un coeficiente de variación del 26%. El valor diario máximo registrado fue de 27.8 MJ.m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, y el mínimo de 8.7 MJ.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup>, con una media de 18.3 MJ.m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. Al respecto Vacher, citado por Germain (2004), indica que en el Altiplano la radiación presenta valores elevados, reportando un promedio anual de 22.00 MJ.m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, y en Viacha se registró una radiación global promedio de 21.25 MJ.m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (Gráfico 5).



**Gráfico 5. Variación de la radiación global diaria (MJ.m<sup>2</sup>.día<sup>-1</sup>) durante el periodo de ensayo**

#### 4.1.1.4. Análisis de suelo

El análisis físico – químico realizado por el laboratorio de suelos de CETABOL – JICA (Okinawa, Santa Cruz), reporto un suelo de textura franca, de pH neutro.

Respecto a las concentraciones de macronutrientes, reportaron niveles moderados en nitrógeno total 0.13%, niveles bajos en nitrógeno disponible y fósforo, muy altos en potasio, valores que fueron corroborados por Callizaya (1994) además indico la carencia del magnesio a causa del efecto antagónico del potasio.

El contenido de materia orgánica fue 3.2% considerada como moderada. El CIC presentó baja capacidad de almacenamiento de agua y mayor lixiviación de nitrógeno y potasio. El suelo no presento problemas de salinidad (Anexo 2, cuadro 1). Las características físicas del suelo se detallan en el anexo 2, cuadro 2.

## **4.2. Condiciones del cultivo**

### **4.2.1. Siembra y emergencia**

La siembra se realizó el 30 de octubre y el 27 de noviembre (unidades experimentales 10 y 15) de la gestión 2002. La emergencia en el T1 se inicio a los 10 dds y se prolongó hasta los 15 días. Después de realizar el mapeo se evidencio una homogeneidad de cobertura, que permitió definir segmentos de evaluación. La densidad promedio poblacional fue de 65 pl.m<sup>-2</sup>, presentando rangos de 136 y 24 pl.m<sup>-2</sup>. La tasa de emergencia fue del 25%.

La emergencia en el T2 fue irregular y lenta, se inicio a los 10 dds y se prolongó hasta los 20 días después de la siembra. El mapeo de cobertura demostró poca homogeneidad, observando algunos vacíos en las parcelas de este tratamiento. La densidad promedio poblacional fue de 53 pl.m<sup>-2</sup> y los valores extremos reportados fueron 128 y 16 pl.m<sup>-2</sup>. Presento una tasa de emergencia del 24%.

En el T3 la emergencia se inició a los 13 dds y se prolongo hasta los 25 días. El mapeo de cobertura demostró que la variación de la emergencia también había provocado heterogeneidad en la cobertura y vigor de recubrimiento en parcelas de este tratamiento. El resultado de la variación reportó un rango de 80 a 16 pl.m<sup>-2</sup> y la densidad promedio poblacional fue de 38 pl.m<sup>-2</sup>. La tasa de emergencia fue del 17%.

La emergencia en T4 fue más heterogénea, se inicio a los 10 dds y se prolongó hasta los 25 días. El mapeo realizado a los 65 dds, determino que la variación en la emergencia, provoco también variaciones en la cobertura de recubrimiento. El promedio poblacional fue de 54 pl.m<sup>-2</sup>, reportando valores extremos de 152 pl.m<sup>-2</sup> y 12 pl.m<sup>-2</sup>. La tasa de emergencia en este tratamiento fue del 21%.

#### **4.2.2. Factores adversos**

La falta de humedad en los primeros 20 días del cultivo afecto seriamente la tasa de emergencia, causando una implantación irregular en los tratamientos T2, T3 y T4. Sin embargo, la implantación en el tratamiento T1 fue mas regular que los anteriores, además se presentó una granizada intensa a los 83 dds, cuando el cultivo se encontraba en fase vegetativa, causando magulladuras en los tallos y la reducción del área fotosintetizante, que a la larga provocaron la caída de las plantas por debilidad de los tallos que no pudieron mantenerse erguidas durante la madurez del grano, así también provocaron la muerte de plantas durante el ensayo.

La falta de precipitación al inicio de la implantación del cultivo y la intensa granizada, evitaron que muchos segmentos de los tratamientos con Surumi T2 y T3 no pudieran ser evaluados, asimismo la helada negra que se produjo a los 161 dds, afecto al tratamiento T4, acelerando la madurez y deteniendo el proceso de llenado de los granos.

La presencia de pájaros durante la madurez del grano no pudo ser controlada, pero la enfermedad del mildiu (*Peronospora farinosa*) se controló con un fungicida sistémico (Ridomil), mediante dos aplicaciones, realizadas a los 113 y 120 dds.

#### **4.2.3. Fisionomía del cultivo a los 65 dds**

Realizando un control visual de la homogeneidad del cultivo dentro de cada unidad experimental, se encontró una fuerte heterogeneidad del aspecto del cultivo, debido a variaciones de densidad, altura y densidad del dosel. Este hecho no permitió seguir con el enfoque de análisis de varianza con un diseño monofactorial con bloques al azar, por lo tanto se decidió optar otra estrategia de sondeo,

aprovechando la heterogeneidad encontrada en cada tratamiento. En todo el campo experimental, se buscó todas las zonas que presentaban un área mínima de un metro cuadrado y de aspecto homogéneo, luego cada zona recibió una nota de 0 a 10 para calificar el vigor del cultivo.

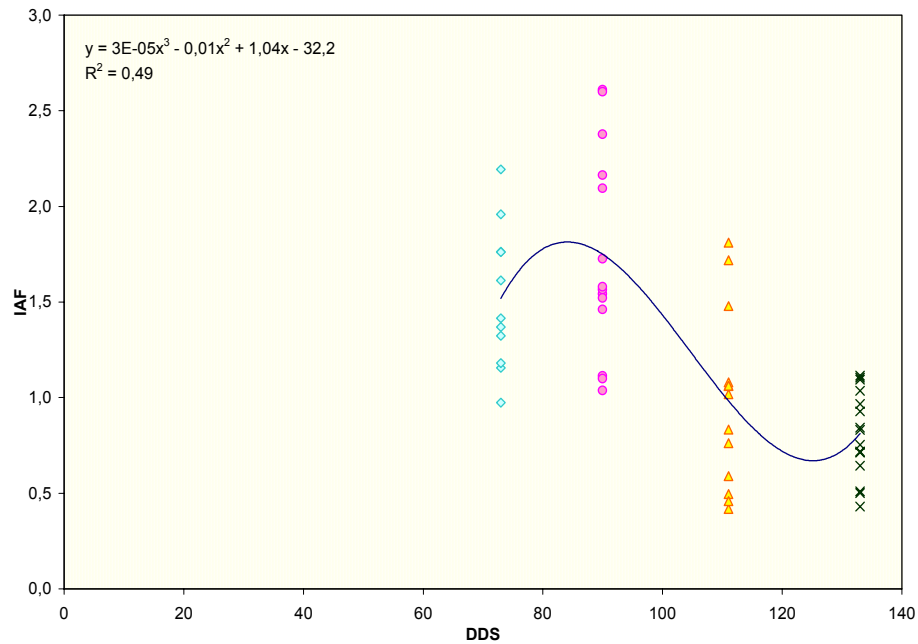
Se planificaron 5 fechas de muestreo con un mínimo de 10 segmentos por fecha y por tratamiento. Cada segmento muestreado era representativo de una zona calificada con una nota de vigor, que estaba ubicado al centro de la zona homogénea. Para cada fecha y tratamiento, se planificó escoger zonas con la más amplia variación posible de valores de nota, el granizo que se presentó afectó particularmente a los tratamientos con Surumi, y el objetivo de contar con 50 sondeos mínimos no pudo ser cumplido en el tratamiento T3, donde el número de muestreos fue de solo 25.

### **4.3. Observaciones en Blanca de Yanamuyu, tratamiento T1**

#### **4.3.1. Variaciones en los muestreos del índice de área foliar**

El coeficiente de determinación de la ecuación polinomial de tercer orden de la relación IAF en función a los DDS fue significativo (Gráfico 6), además se observan variaciones en cada fecha de evaluación, presentando a la primera fecha (73 dds) un rango de 0.97 a 2.2, promedio de 1.5, desvío estándar (DS) de 0.37 con un coeficiente de variación (CV) de 24%.

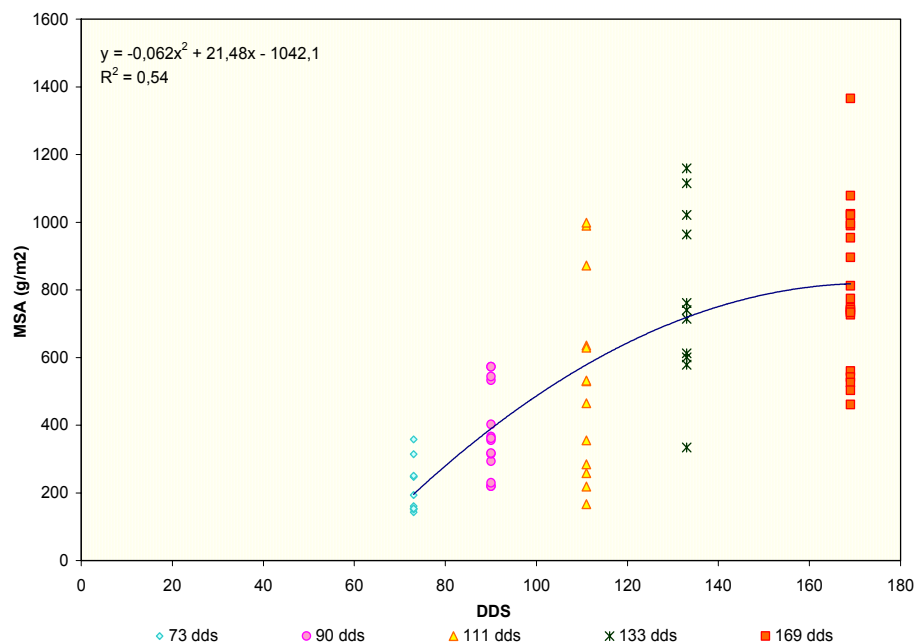
A la segunda evaluación (90 dds) se tuvo un rango de 1.0 a 2.6, promedio de 1.7, (DS) de 0.53 con un (CV) de 30%, en la tercera fecha (111 dds), el rango fue de 0.42 a 1.8, promedio de 0.98, (DS) de 0.46, con un (CV) de 46%. Finalmente a los 133 dds se reportaron valores extremos de IAF de 0.43 a 1.1, promedio de 0.81, (DS) de 0.23 y el (CV) de 28% (Anexo 4, cuadro 4).



**Gráfico 6. Variaciones del índice de área foliar, tratamiento 1**

#### **4.3.2. Variaciones en los muestreos del crecimiento aéreo**

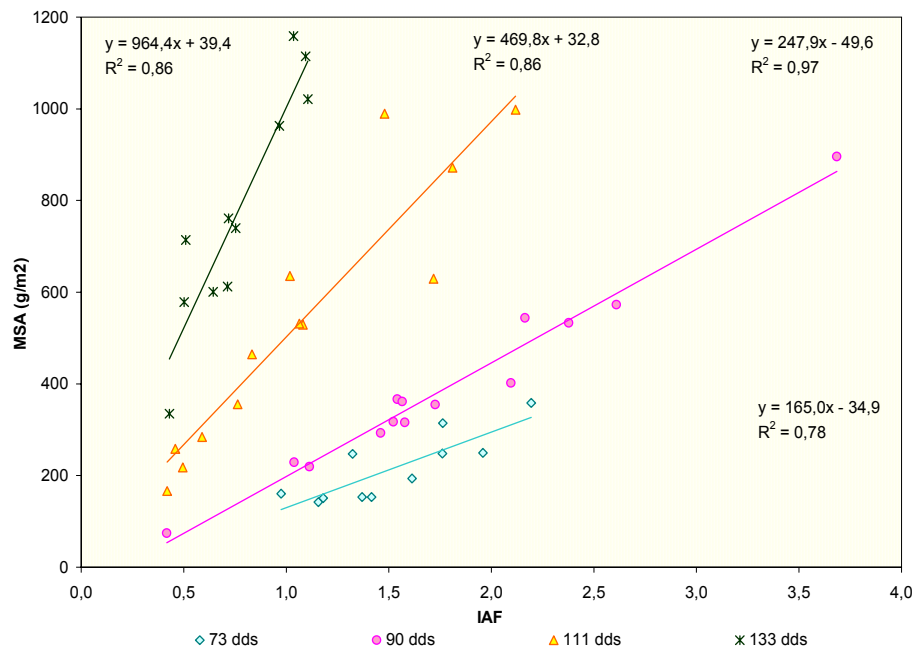
La evolución de la materia seca aérea MSA en función a los días después de la siembra (DDS), se ajustó a una regresión de segundo grado, que resulto significativa (Gráfico 7), asimismo, a partir de la primera evaluación (73 dds) se observaron variaciones de la MSA de  $160.8 \text{ g m}^{-2}$  a  $358.4 \text{ g m}^{-2}$ , presentando un promedio de  $207 \text{ g m}^{-2}$ , a la segunda fecha (111 dds) el rango estuvo entre  $166.4 \text{ g m}^{-2}$  a  $998.4 \text{ g m}^{-2}$ , promedio de  $393 \text{ g m}^{-2}$ . Finalmente a la cosecha (169 dds) el rango fue mas amplio presentando valores de  $461.2 \text{ g m}^{-2}$  a  $1366.0 \text{ g m}^{-2}$  con un promedio de  $683 \text{ g m}^{-2}$ .



**Gráfico 7. Variaciones en la acumulación de materia seca aérea, tratamiento 1**

#### 4.3.3. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar

Cada fecha de evaluación presentó coeficientes de determinación altamente significativos (Gráfico 8), a pesar de ello se observaron variaciones, así a los 73 dds la MSA reportó un rango de  $160.8 \text{ g.m}^{-2}$  a  $358.4 \text{ g.m}^{-2}$ , cuando se tuvieron valores de IAF de 0.97 y 2.2 respectivamente, a los 90 dds la variación de la MSA fue de  $74.5 \text{ g.m}^{-2}$  a  $573.0 \text{ g.m}^{-2}$  con IAF de 1.0 y 2.6. A los 111 dds cuando el cultivo se encontraba en plena floración, el rango de MSA fue de  $166.4 \text{ g.m}^{-2}$  a  $998.4 \text{ g.m}^{-2}$  que presentaron IAF de 0.42 y 2.1, finalmente a los 133 dds el rango de la MSA fue de  $334.6$  a  $1159.1$  cuando se tuvieron IAF de 0.43 y 1.1.



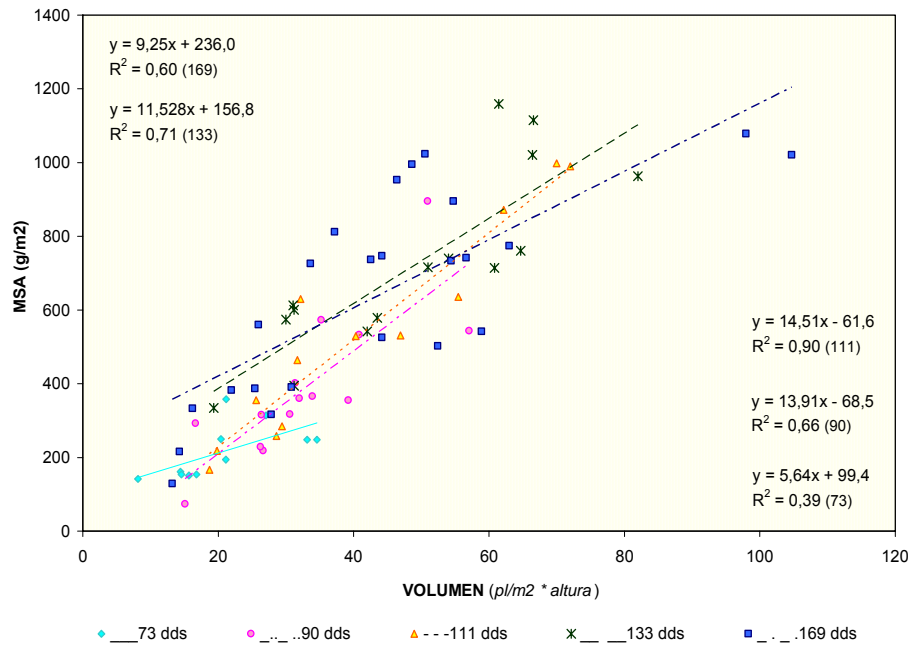
**Gráfico 8. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar, tratamiento 1**

#### 4.3.4. Relación entre la materia seca aérea y el volumen

Las regresiones lineales efectuadas para cada fecha de evaluación, fueron significativas y altamente significativas (Gráfico 9), esta relación efectuada entre MSA en función al volumen, mostró un coeficiente de determinación significativa a los 73 dds y fue diferente a las posteriores fechas. También, se observó comportamientos muy semejantes a partir de la segunda fecha, así las evaluaciones efectuadas a los 90 dds y 111 dds siguieron una misma pendiente luego de comparar los coeficientes a y b de las ecuaciones de regresión. Asimismo se observó poca similitud entre evaluaciones realizadas a los 133 dds y 169 dds que fueron superiores a las fechas anteriores.

Se decidió realizar observaciones independientes de los valores a los 133 dds, fecha en que presentó mayor variación, el máximo registrado en volumen fue de 61 y en MSA de 1159.1 g.m<sup>-2</sup> (corresponde a 0.96 m de altura y 64 pl.m<sup>-2</sup>), el valor mínimo fue 19 y 334.6 g.m<sup>-2</sup> (corresponde a 0.69 m y 28 pl.m<sup>-2</sup>), a la cosecha (169 dds) el máximo en MSA fue 1366.0 g.m<sup>-2</sup> (corresponde a 0.89 m y a 76 pl.m<sup>-2</sup>), y el mínimo fue 128.8 g.m<sup>-2</sup> (corresponde a 0.54 m y 40 pl.m<sup>-2</sup>).



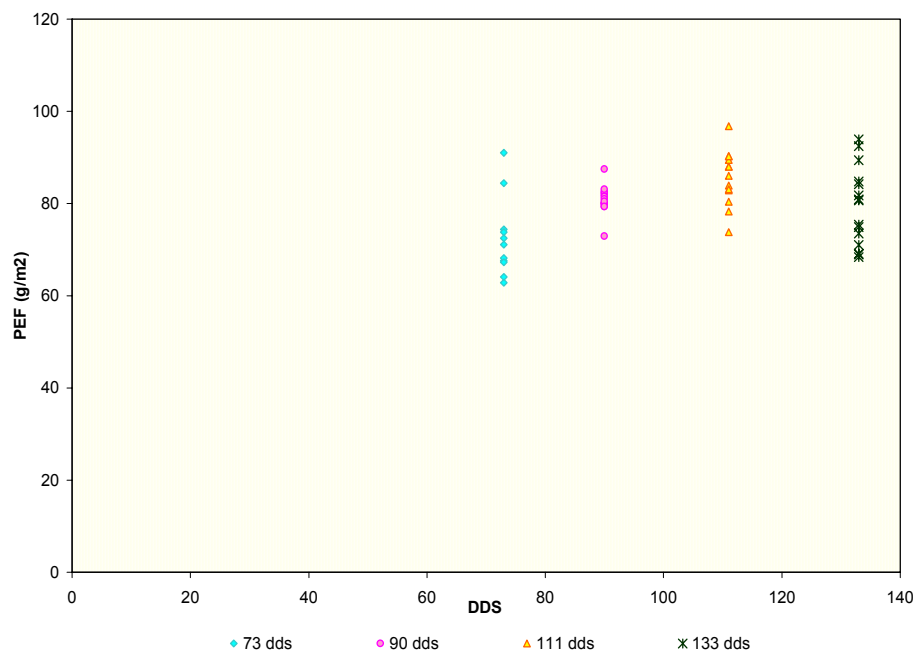


**Gráfico 9. Relación entre la MSA y el VOLUMEN, tratamiento 1**

#### 4.3.5. Evolución del peso específico foliar

El peso específico foliar tuvo un comportamiento homogéneo a partir de los 73 dds hasta los 133 dds (Gráfico 10). Los valores promedios del PEF reportados fueron 72 g.m<sup>-2</sup> a los 73 dds, 81 g.m<sup>-2</sup> a los 90 dds, 85.5 g. m<sup>-2</sup> a los 111 dds y finalmente a la última fecha (133 dds) fue 79 g. m<sup>-2</sup>. Los rangos de PEF, promedio, desvío estándar (DS) y coeficiente de variación (CV) se detallan en el anexo 5, cuadro 8.

La comparación de promedios determinó que no hubo diferencias significativas entre fechas de evaluación (Anexo 5, cuadro 9).

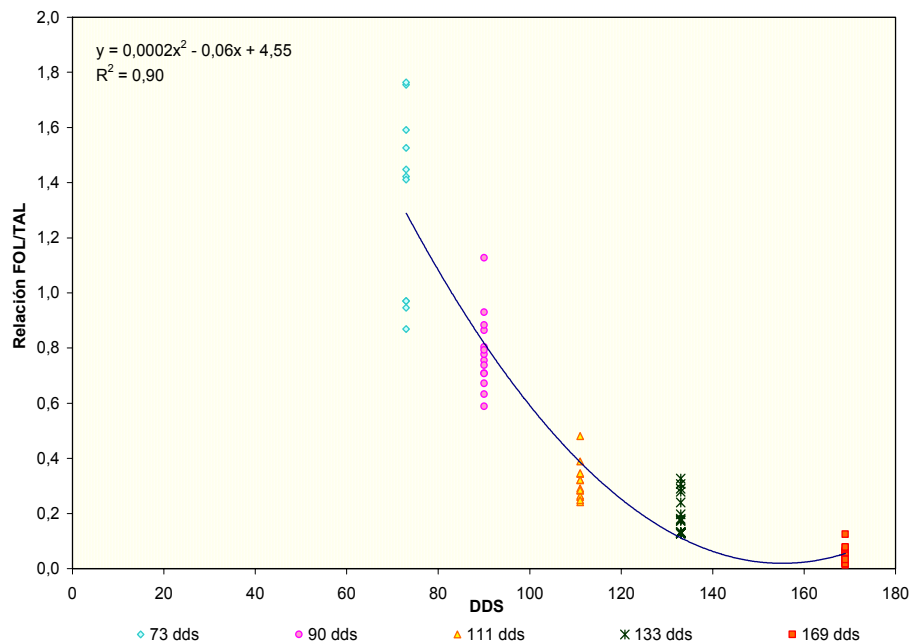


**Gráfico 10. Evolución del peso específico foliar, tratamiento 1**

#### 4.3.6. Evolución de la relación entre hoja y tallo

El coeficiente de determinación de la ecuación de segundo grado de la relación establecida entre hoja y tallo fue altamente significativa (Gráfico 11), resultando en la fase vegetativa (73 dds) un coeficiente de 1.21, lo que señala que la materia seca del tallo representó el 45% de la materia seca aérea y el restante 55% correspondía a la materia seca foliar. A los 90 dds, cuando el cultivo se encontraba en panojamiento, el coeficiente disminuyó a 0.73, por tanto la materia seca foliar representó el 73% de la materia seca del tallo.

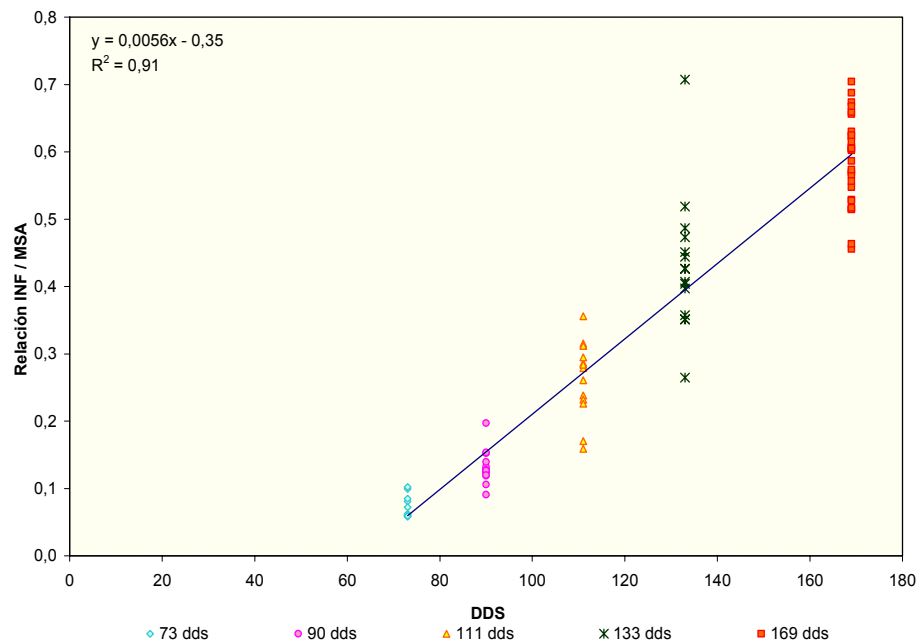
En floración la materia seca foliar correspondía el 29% del total de la materia seca del tallo, con la senescencia de las hojas después de la floración, se tuvo un coeficiente de 0.19 a los 133 dds, al momento de realizar la cosecha (169 dds) el coeficiente de la relación fue aún mas inferior, llegando a 0.03, lo que significa que la masa foliar había casi desaparecido totalmente (Anexo 6, cuadro 16).



**Gráfico 11. Relación entre hoja y tallo, tratamiento 1**

#### **4.3.7. Evolución de la relación entre inflorescencia y materia seca aérea**

La relación entre inflorescencia INF y materia seca aérea MSA, fue lineal y altamente significativa (Gráfico 12), obteniendo una relación positiva a través del tiempo, a la primera fecha de evaluación (73 dds) cuando el cultivo estuvo en fase vegetativa (73 dds), la INF representó el 11% de la MSA, a los 90 dds fase de panojamiento la INF se incremento en dos unidades llegando a representar el 13% de la MSA, y en plena floración la INF llego al 25% del total de la MSA. Con el inicio de la madurez de grano (133 dds) el coeficiente de dicha relación se incrementó aún más, llegando a representar el 41% de la MSA, y a los 169 dds (cosecha), la INF llego a representar el 45% del total de la MSA (Anexo 7, cuadro 20).



**Gráfico 12. Relación entre inflorescencia y materia seca aérea, tratamiento 1**

#### 4.3.8. Índice de cosecha

Al momento de la cosecha, la materia seca de la INF llegó a representar el 45% de la MSA, además la relación establecida entre grano e inflorescencia a la misma fecha determinó un coeficiente de 0.63, asumiendo que el 45% representa el 100% de la materia seca de la inflorescencia, entonces el 63% corresponde al peso de los granos (Anexo 7, cuadro 20), el IC fue 0.28 que resultó del producto entre la relación INF/MSA y la relación GRA/INF ( $0.45 * 0.63$ ), IC que se consideró aceptable por tener un comportamiento regular durante la campaña agrícola de la región.

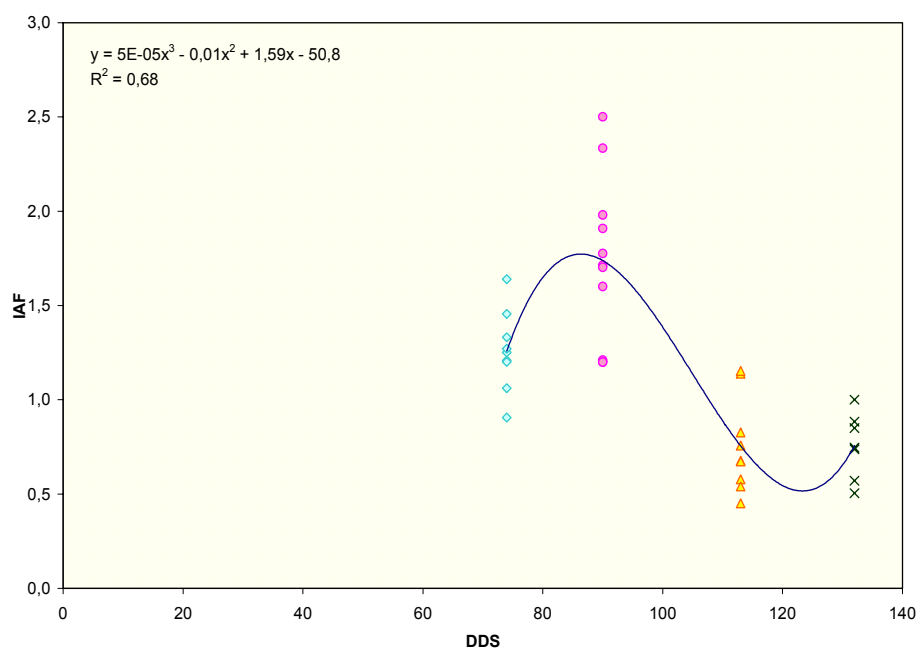
#### 4.4. Observaciones en Surumi, tratamiento T2

##### 4.4.1. Variaciones en los muestreos del índice de área foliar

Respecto a la evolución del IAF a través del tiempo, se encontró un coeficiente de determinación significativo (Gráfico 13), asimismo se observaron variaciones en cada fecha de evaluación, así se tiene que a 74 dds, el IAF presentó valores de

0.91 a 1.6, promedio de 1.3, desvió estándar (DS) de 0.21 y un coeficiente de variación (CV) de 16%.

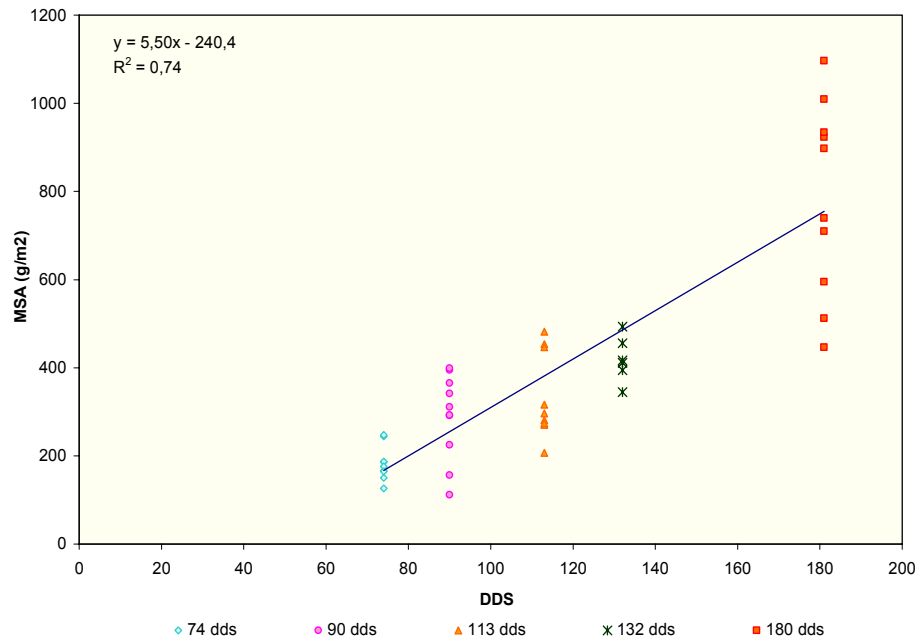
En fase de panojamiento (90 dds) el promedio fue de 1.7 promedio máximo reportado para este tratamiento, el (DS) de 0.44, el (CV) de 25%. A la floración, (111 dds), el rango presentó valores de 0.40 a 1.1, promedio de 0.80, (DS) de 0.24 y el (CV) de 32%. Finalmente a los 132 dds el rango fue 0.50 a 1.0, promedio de 0.76, (DS) de 0.17, con un (CV) de 23% (Anexo 4, cuadro 5).



**Gráfico 13. Variaciones del índice de área foliar, tratamiento 2**

#### 4.4.2. Variaciones en los muestreos del crecimiento aéreo

Respecto a la evolución de la MSA en función de los DDS, se encontró un coeficiente de determinación de la regresión lineal altamente significativo (Gráfico 14), además presentó variaciones de la MSA en cada fecha, por ejemplo a 74 dds, el valor mínimo fue 126.4 g.m<sup>-2</sup> y el máximo de 244.2 g.m<sup>-2</sup>; a los 113 dds el rango estuvo entre 206.4 g.m<sup>-2</sup> y 453.2 g.m<sup>-2</sup>, por último a los 181 dds, cuando se realizó la cosecha, la MSA reportó mayor variación, presentando valores más amplios desde 446.8 g. m<sup>-2</sup> a 1096 g. m<sup>-2</sup>.

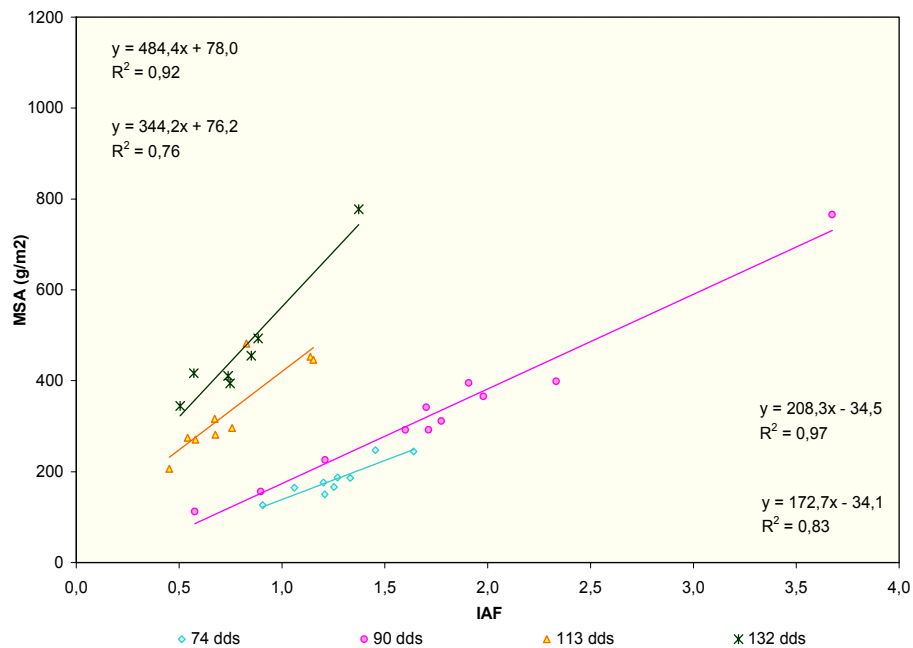


**Gráfico 14. Variaciones en la acumulación de materia seca aérea, tratamiento 2**

#### 4.4.3. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar

El coeficiente de determinación de la regresión hallada fue lineal y altamente significativa (Gráfico 15), se observó que durante la fase vegetativa (74 dds), hubo variación en cuanto a los valores de la MSA desde un mínimo de 126.4 g.m<sup>-2</sup> hasta un máximo de 244.2 g.m<sup>-2</sup>, los mismos que presentaron IAF de 0.91 y 1.6. A los 90 dds el rango de MSA e IAF fueron más amplios de 112.0 g.m<sup>-2</sup> y 765.4 g.m<sup>-2</sup> y los IAF que corresponden a tales valores fueron de 0.58 y 3.7 respectivamente. A esta fecha se observó la prolongación de la línea de la pendiente causado por los valores altos de IAF.

A la floración (111 dds) se reportaron valores extremos de MSA de 206.4 g.m<sup>-2</sup> a 481.6 g.m<sup>-2</sup> con IAF de 0.45 y 0.83, finalmente a los 132 dds la MSA presentó valores de 334.5 g.m<sup>-2</sup> y 777.2 g.m<sup>-2</sup> cuando los valores de IAF fueron de 0.51 y 1.3. La reducción continua del IAF se produce gracias a la caída permanente de las hojas.

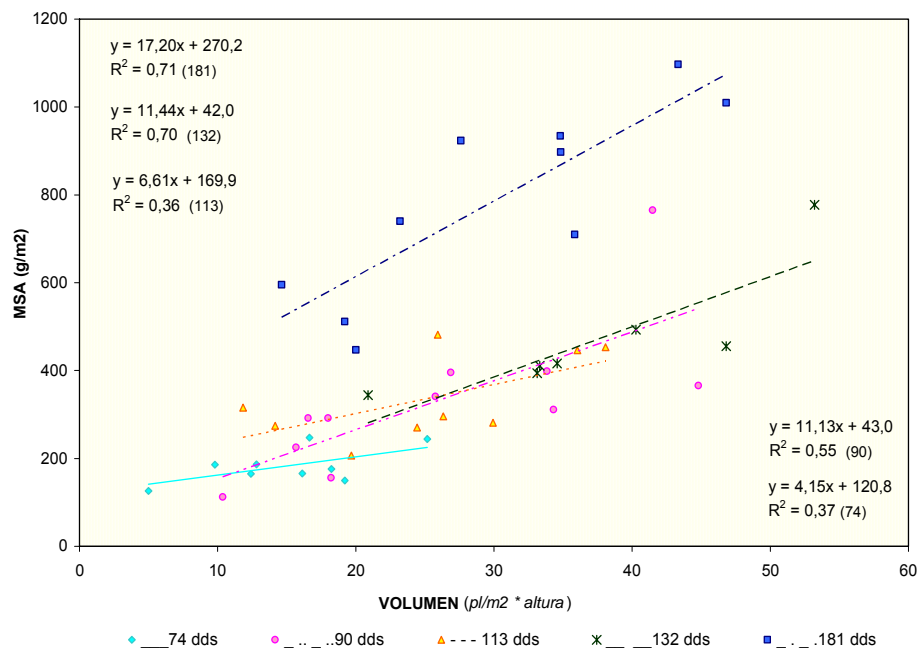


**Gráfico 15. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar, tratamiento 2**

#### 4.4.4. Relación entre la materia seca aérea y el volumen

Las regresiones lineales efectuadas para cada fecha de evaluación, entre la materia seca y el volumen, presentó para los 74 dds y 113 dds un coeficiente de determinación significativo y que ambos presentaron similitudes en la pendiente, sin embargo la línea de la pendiente de los 113 dds estuvo muy por encima de la línea de la pendiente de los 74 dds, por presentar una mayor acumulación en MSA.

El comportamiento de la relación entre MSA en función al volumen fue similar entre los 90 dds y 132 dds, se llegó a esa determinación luego de comparar los coeficientes  $a$  y  $b$  de la ecuación de regresión. Finalmente a los 181 dds la relación se incrementó bruscamente, reportando valores bastante dispersos y que fue superior a las anteriores evaluaciones (Gráfico 16).



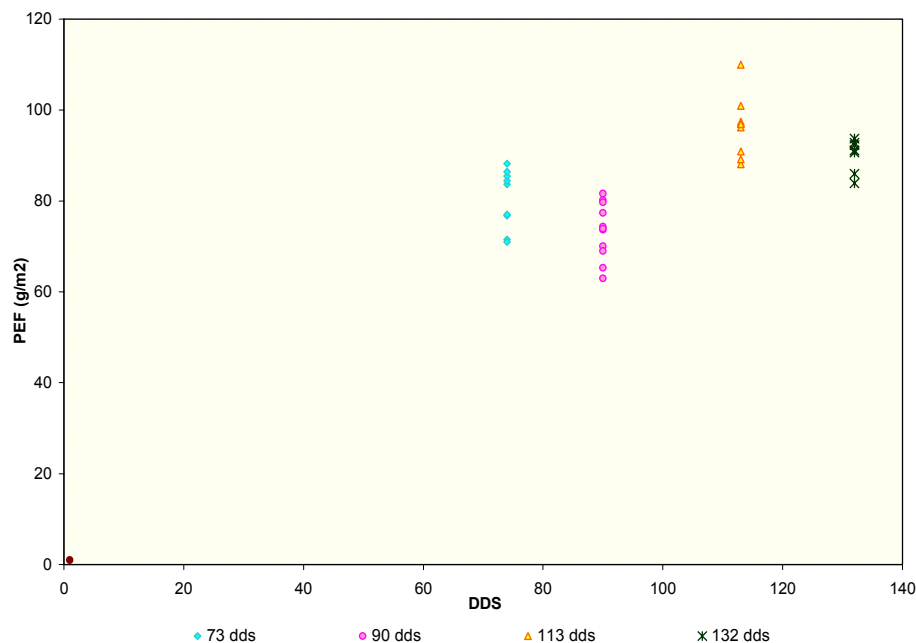
**Gráfico 16. Relación entre la MSA y el VOLUMEN, tratamiento 2**

La dispersión de los valores de MSA en función al volumen a los 132 dds, muestran un volumen máximo de 50.9 y un máximo en MSA de 772.2 g.m<sup>-2</sup> (corresponde a un segmento de 0.70 m de altura y una densidad de población de 76 pl.m<sup>-2</sup>), el mínimo valor fue de 20 y 344.5 g.m<sup>-2</sup> (corresponde a 0.58 m y 36 pl.m<sup>-2</sup>), a la cosecha 181 dds el valor máximo fue 40.3 y 1096.8 g.m<sup>-2</sup> (corresponde a 0.58 y 76 pl.m<sup>-2</sup>), y el mínimo fue 15 y 595 g.m<sup>-2</sup> (corresponde a 0.66 y 24 pl.m<sup>-2</sup>).

#### 4.4.5. Evolución del peso específico foliar

La evolución del peso específico foliar (PEF), en el tratamiento T2, presentó dos grupos con comportamientos similares, siendo que a los 74 y 90 dds los valores promedios reportados fueron de 80.5 g.m<sup>-2</sup> y 73.5 g.m<sup>-2</sup>, a los 113 y 132 dds los valores promedios fueron de 96.3 g.m<sup>-2</sup> y 90.1 g.m<sup>-2</sup>. (Gráfico 17)





**Gráfico 17. Evolución del peso específico foliar, tratamiento 2**

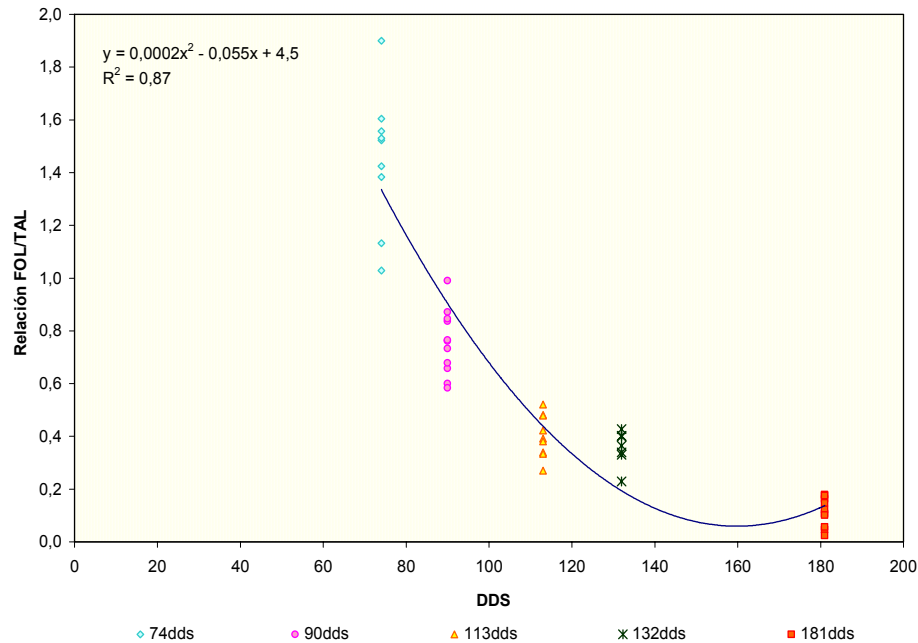
A la primera evaluación el rango fue de  $71 \text{ g.m}^{-2}$  a  $82 \text{ g.m}^{-2}$ , el desvío estándar (DS) de 6.5 y el (CV) de 8%, a la segunda fecha el rango fue de  $63.3 \text{ g.m}^{-2}$  a  $81 \text{ g.m}^{-2}$ , el (DS) de 6.1 y el (CV) del 8%, a la tercera fecha los valores fueron de  $88.1 \text{ g.m}^{-2}$  a  $96.3 \text{ g.m}^{-2}$ , el (DS) de 6.7 y el (CV) del 7%. Concluyendo la evaluación a los 132 dds se presentaron valores de  $83.9 \text{ g.m}^{-2}$  a  $93.7 \text{ g.m}^{-2}$ , un (DS) de 3.7 y un (CV) de 4% (Anexo 5, cuadro 10).

La diferencia de medias determinó que si hubo diferencias significativas entre el grupo de las dos primeras evaluaciones y el grupo de las dos últimas evaluaciones (Anexo 5, cuadro 11).

#### **4.4.6. Evolución de la relación entre hoja y tallo**

La relación establecida entre el crecimiento foliar FOL y el crecimiento del tallo TAL fue altamente significativa (Gráfico 18), así en la primera evaluación, cuando el cultivo estuvo en fase vegetativa (74 dds) se reportó un coeficiente de 1.38, esto señala que la materia seca del TAL representaba el 42% de la MSA y el 58% correspondía a la

materia seca del FOL, considerando que en esta fecha aun no se inició la fase reproductiva. .



**1.1.1 Gráfico 18. Relación entre hoja y tallo, tratamiento 2**

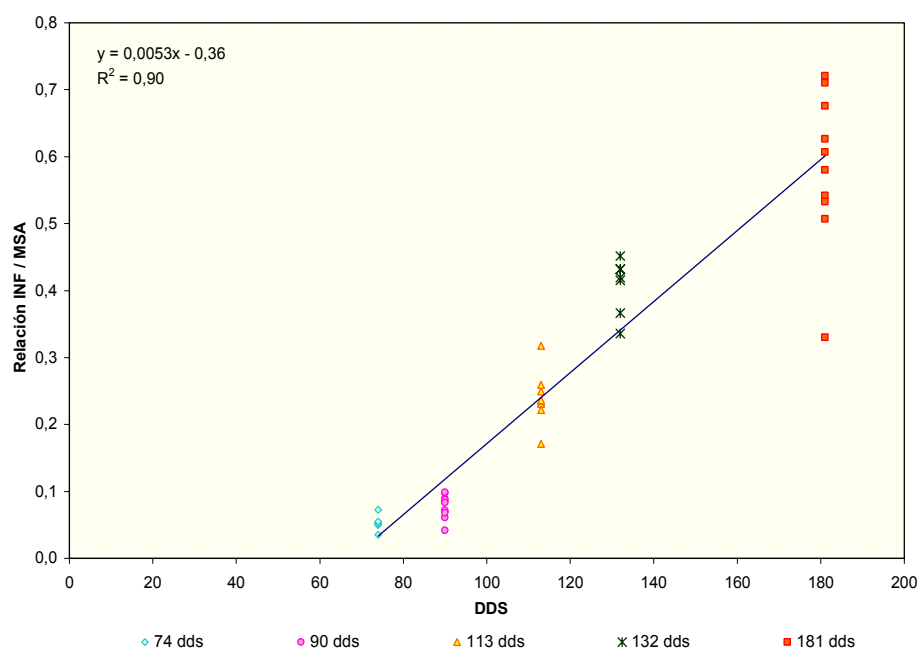
En panojamiento (90 dds) el coeficiente de la relación disminuyó a 0.73, fecha en que la materia seca del FOL corresponde el 73% del 100% de la materia seca del TAL, con el desarrollo del cultivo la relación disminuye continuamente reportando a los 111 dds un coeficiente de 0.40. A partir de la madurez del grano (132 dds) se observan la pérdida permanente de hojas hasta los 181 dds (cosecha) debido a la selenidad, a esta fecha la materia seca del FOL llegó a representar el 11% del total de la materia seca del TAL (Anexo 6, cuadro 17).

#### **4.4.7. Evolución de la relación entre inflorescencia y materia seca aérea**

La evolución de la relación inflorescencia INF y materia seca aérea MSA en función de los DDS fue lineal y reportó un coeficiente de determinación altamente significativo (Gráfico 19), determinando que en la fase vegetativa (74 dds) el coeficiente de la relación fue 0.05, que se considera el inicio de la formación de la inflorescencia. Entonces se puede considerar que el inicio del panojamiento tuvo

lugar a los 70 dds. A los 90 dds cuando el cultivo se encontraba en pleno panojamiento la INF representó el 7.9% de la MSA.

A los 113 dds la materia seca de la INF correspondía el 23% de la MSA, a los 132 dds la relación aumentó favoreciendo a la INF, que representó el 41% del total de la MSA, y a la cosecha el coeficiente de la relación fue de 0.56, por tanto la INF llegó a superar el 50% de la MSA (Anexo 7, cuadro 21).



**Gráfico 19. Relación entre inflorescencia y materia seca aérea, tratamiento 2**

#### 4.4.8. Índice de cosecha

A la cosecha 181 dds, la materia seca de la INF representó el 56% de la MSA, a la misma fecha la relación grano e inflorescencia, reportó un coeficiente de 0.53, por lo que se considera que el 56% representa el 100% de la materia seca de la inflorescencia, el 53% corresponde al peso de los granos (Anexo 7, cuadro 21). Entonces el tratamiento T2 reportó un IC de 0.29, valor que resulta del producto de los coeficientes (0.56 y 0.53). Índice de cosecha que se consideró aceptable por tener un comportamiento regular dentro de la campaña agrícola de la región.

## 4.5. Observaciones en Surumi bajo fertilización, tratamiento T3

### 4.5.1. Variaciones en los muestreos del índice de área foliar

El coeficiente de determinación de la regresión lineal realizada para la evolución del IAF fue significativa (Gráfico 20), y además presentó variaciones por fecha de muestreo, así a 91 dds el rango fue de 1.7 a 2.9, el promedio de 2.1, el (DS) de 0.44, y el (CV) de 20%. En la última evaluación (137 dds) los valores extremos fueron de 1.2 a 2.4, el promedio de 1.5, el (DS) de 0.23 y el (CV) de 15% (Anexo 4, cuadro 6).

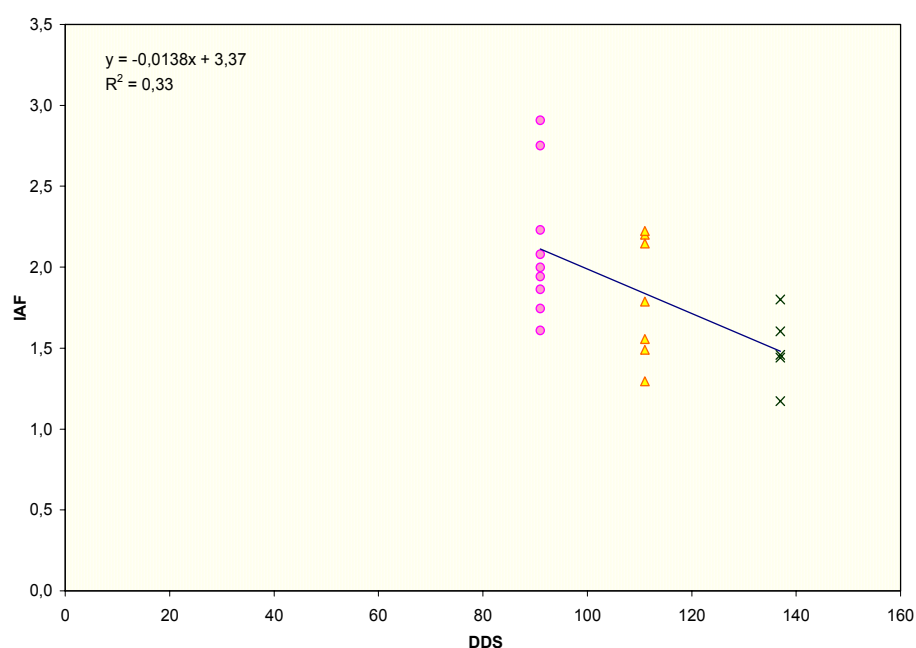
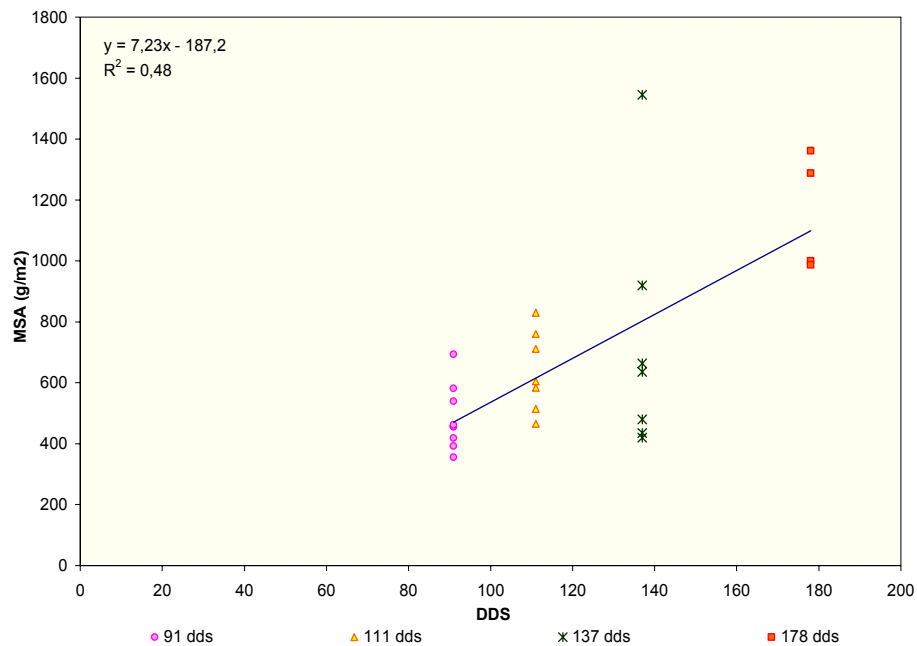


Gráfico 20. Variaciones del índice de área foliar, tratamiento 3

### 4.5.2. Variaciones en los muestreos del crecimiento aéreo

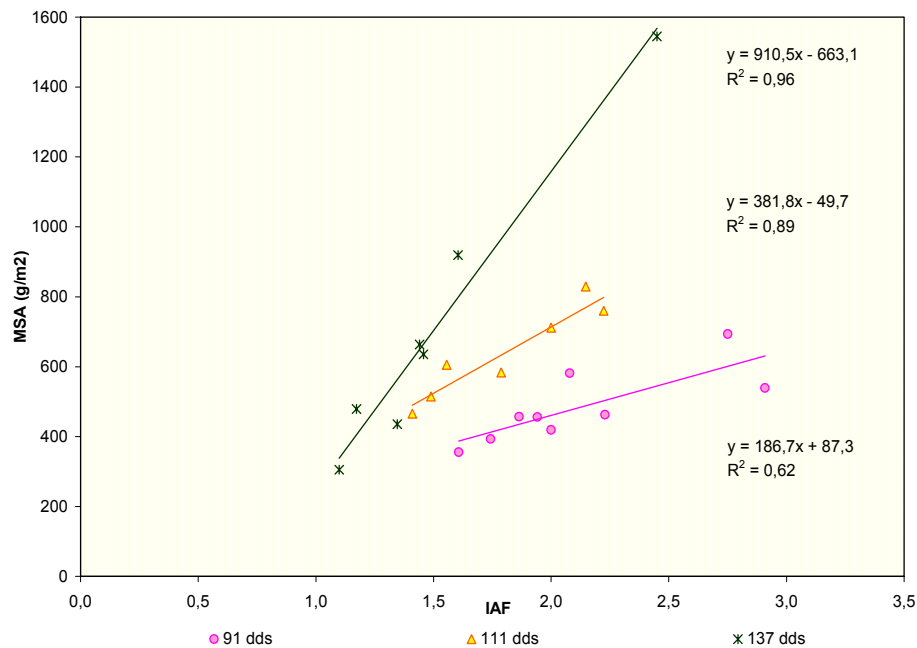
La evolución de la MSA en función a los DDS, presentó un coeficiente de determinación de la regresión lineal altamente significativo, a pesar de la significancia hallada, se observó variaciones dentro de cada fecha de muestreo, presentando a 91 dds los valores extremos de 355.4 g.m<sup>-2</sup> a 693 g.m<sup>-2</sup>, posteriormente el rango se mantuvo casi similar a los 113 dds con valores de 359.2 g.m<sup>-2</sup> a 829.2 g.m<sup>-2</sup>. Finalmente a los 137 dds el rango fue más amplio se halló un máximo de 1545.3 g.m<sup>-2</sup> y un mínimo de 435.1 g.m<sup>-2</sup> (Gráfico 21).



**Gráfico 21. Variaciones en la acumulación de materia seca aérea, tratamiento 3**

#### 4.5.3. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar

Para cada fecha de evaluación, el coeficiente de determinación de la regresión lineal establecida entre la MSA en función al IAF fue significativo y altamente significativo. En la primera fecha (90 dds) enseñó un valor mínimo en MSA de 355.4 g.m<sup>-2</sup> que corresponde a un IAF de 1.6, el valor máximo fue 693.0 g.m<sup>-2</sup> que correspondía a un IAF también máximo de 2.7. A 113 dds la máxima acumulación de MSA fue de 822 g.m<sup>-2</sup> cuando el IAF fue 2.1 y la mínima acumulación en MSA fue 359.2 g.m<sup>-2</sup> con un IAF de 1.4, a la última fecha se produjo una máxima acumulación de MSA de 1545.3 g.m<sup>-2</sup> cuando el IAF fue de 2.4, y el mínimo fue 305.2 g.m<sup>-2</sup> y el IAF de 1.3 (Gráfico 22),



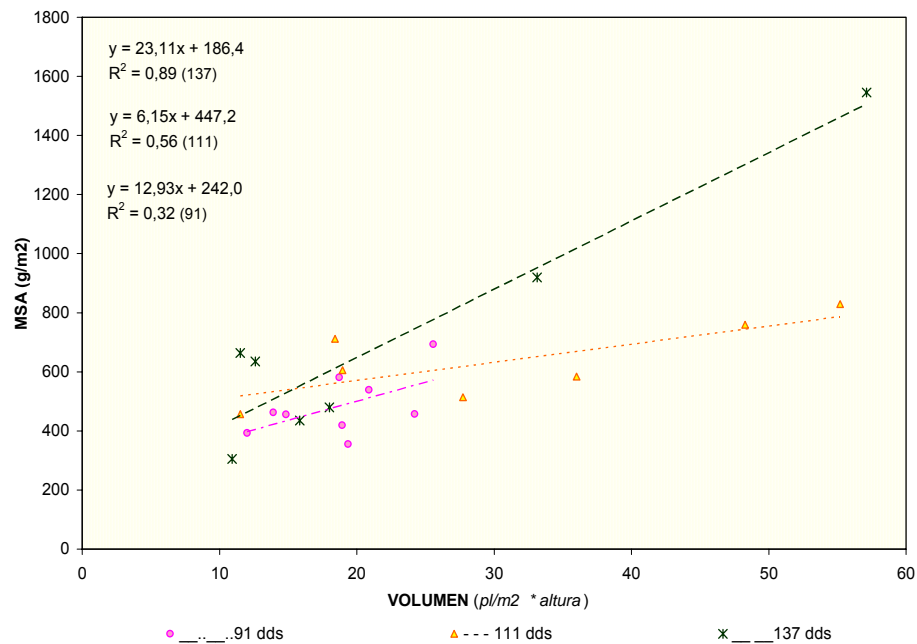
**Gráfico 22. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar, tratamiento 3**

#### 4.5.4. Relación entre la materia seca aérea y el volumen

Para cada fecha de evaluación, el coeficiente de determinación de la regresión lineal establecido mediante la relación MSA en función al volumen, fue significativo o altamente significativo (Gráfico 23).

Cada fecha de evaluación presentó comportamientos independientes. No se observó ninguna similitud entre las pendientes  $b$  de las ecuaciones de regresión de las tres fechas, al contrario se observó que la pendiente  $b$  de la tercera fecha (137 dds) fue superior en 73% a la pendiente  $b$  de la segunda fecha (90 dds).

Las observaciones independientes en cada fecha, muestran que a los 137 dds se presentaron valores máximos del volumen y de la MSA, que fueron de 57 y 1545.3 g.m<sup>-2</sup>, que correspondía a una altura de 0.84 m y una densidad poblacional de 68 pl.m<sup>-2</sup>, y un mínimo de 10 y 305.2 g.m<sup>-2</sup> que correspondía a 0.39 m y 28 pl.m<sup>-2</sup>.

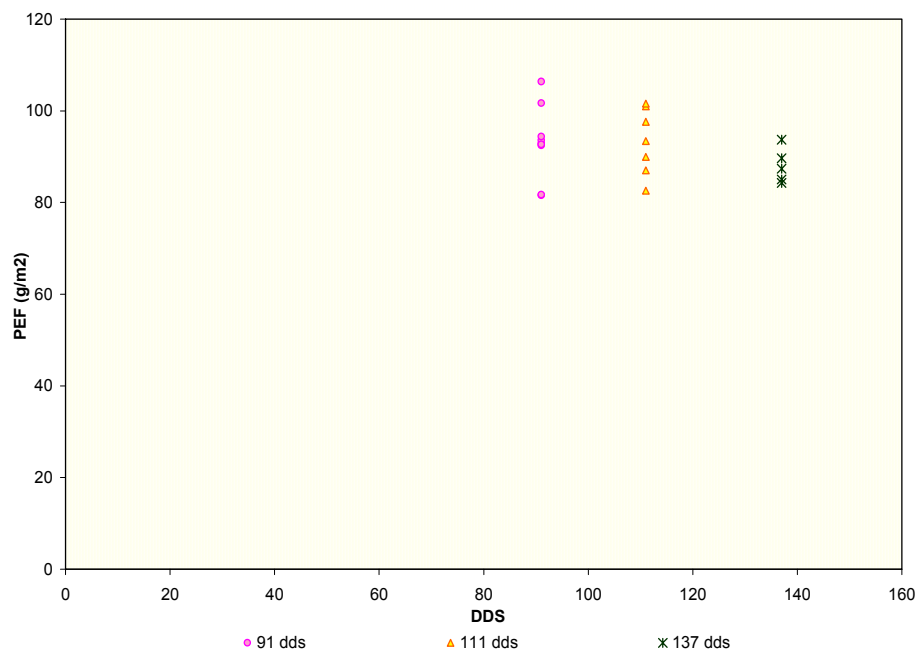


**Gráfico 23. Relación entre MSA y VOLUMEN, tratamiento 3**

#### 4.5.5. Evolución del peso específico foliar

El peso específico foliar en el T3 presentó poca variación dentro de cada fecha (Gráfico 24), a la primera fecha (91 dds) los valores extremos fueron  $81.6 \text{ g.m}^{-2}$  y  $106.4 \text{ g.m}^{-2}$ , el promedio de  $96 \text{ g.m}^{-2}$ , a la segunda fecha el rango fue de  $87.0 \text{ g.m}^{-2}$  a  $101.6 \text{ g.m}^{-2}$ , el promedio de  $93.3 \text{ g.m}^{-2}$ , (DS) de 7.02 con un (CV) de 8%. Finalmente, a 137 dds, el mínimo fue de  $84.3 \text{ g.m}^{-2}$  y el máximo de  $93.7 \text{ g.m}^{-2}$  y una media de  $88 \text{ g.m}^{-2}$ , el (DS) de 3.8, y el (CV) 4% (Anexo 5, cuadro 12).

La comparación de medias no mostró diferencias significativas entre fechas de evaluación (Anexo 5, cuadro 13).



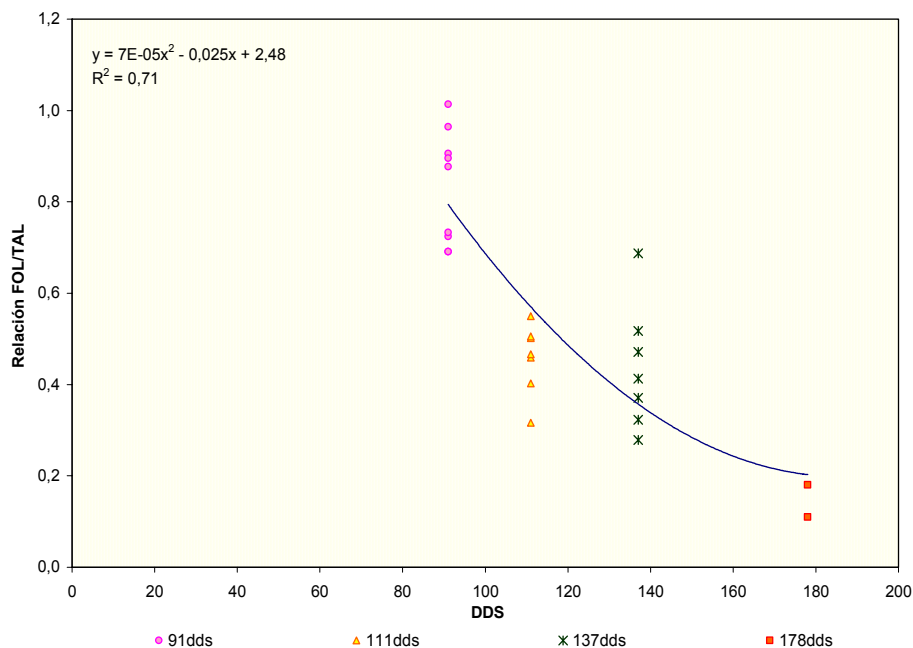
**Gráfico 24. Evolución del peso específico foliar, tratamiento 3**

#### 4.5.6. Evolución de la relación entre hoja y tallo

El coeficiente de determinación de la regresión polinomial para la evolución de la relación entre hoja FOL y tallo TAL resultó altamente significativo, con una relación negativa para la materia seca foliar FOL, que a partir de la primera evaluación hasta la cosecha se observa un decremento continuo, contrario al incremento de la materia seca del tallo (Gráfico 25).

En panojamiento (91 dds), la materia seca de las hojas FOL correspondía el 81% de la materia seca del TAL, en floración la materia seca de hojas se aproxima al cincuenta por ciento, que llegó al 45% del total de la materia seca del tallo TAL, en la última evaluación realizada a la cosecha FOL llegó a representar solo el 14% de la materia seca del tallo, es evidente que en la última etapa, el crecimiento de las hojas es escaso o nulo y que este descenso también es contribuido a su permanente caída (Anexo 6, cuadro 18).



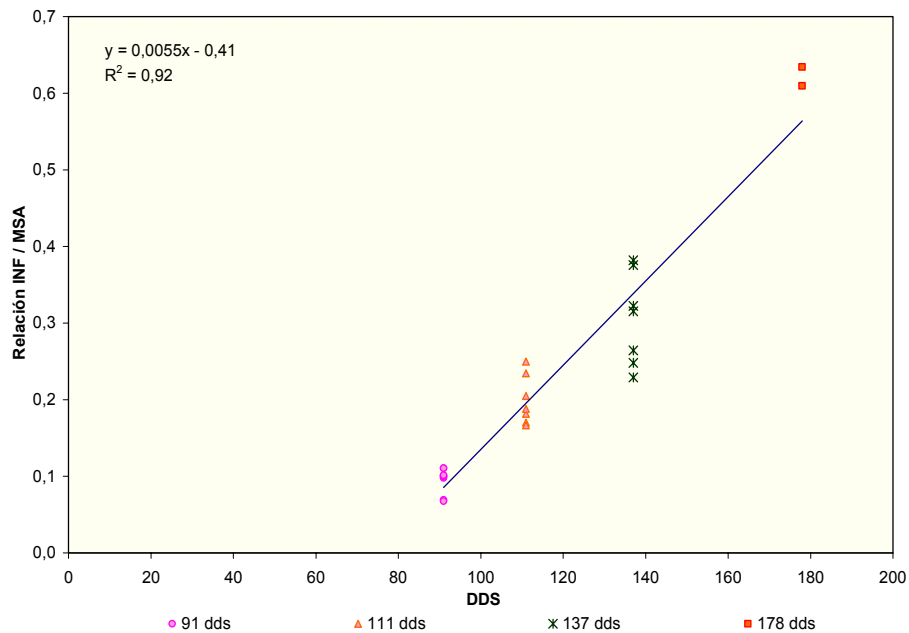


**Gráfico 25. Relación entre hoja y tallo, tratamiento 3**

#### **4.5.7. Evolución de la relación entre inflorescencia y materia seca aérea**

La evolución de la relación inflorescencia INF y materia seca aérea MSA en función a los días después de la siembra DDS presentó un coeficiente de determinación de la regresión lineal altamente significativa, que además muestra una relación positiva a favor de la inflorescencia (Gráfico 26).

En panojamiento, la materia seca de la inflorescencia INF solo representó 9.5% del 100% de la MSA, con la floración el coeficiente se incremento a 19% y a los 137 dds con el inicio de la madurez de grano la INF representó el 28% del total de la MSA. Finalmente a la cosecha con la madurez de grano la relación favoreció aun más a la INF que llegó a superar al sesenta y uno por ciento de la MSA (Anexo 7, cuadro 22).



**Gráfico 26. Relación entre inflorescencia y materia seca aérea, tratamiento 3**

#### 4.5.8. Índice de cosecha

Se había encontrado a la cosecha un coeficiente de 0.61 como resultado de la relación INF/MSA, y que además se hubo determinado una relación entre GRA/INF que resulto un coeficiente de 0.48. Se consideró que del 61% del peso de la materia seca de la inflorescencia a la cosecha (100% de materia seca de inflorescencia), el 48% representaba al peso de los granos (Anexo 7, cuadro 3). En consecuencia el tratamiento 3, presentó un índice de cosecha de 0.29 que resulta del producto de la relación (0.61 y 0.48); que se considera aceptable por tener un comportamiento regular.

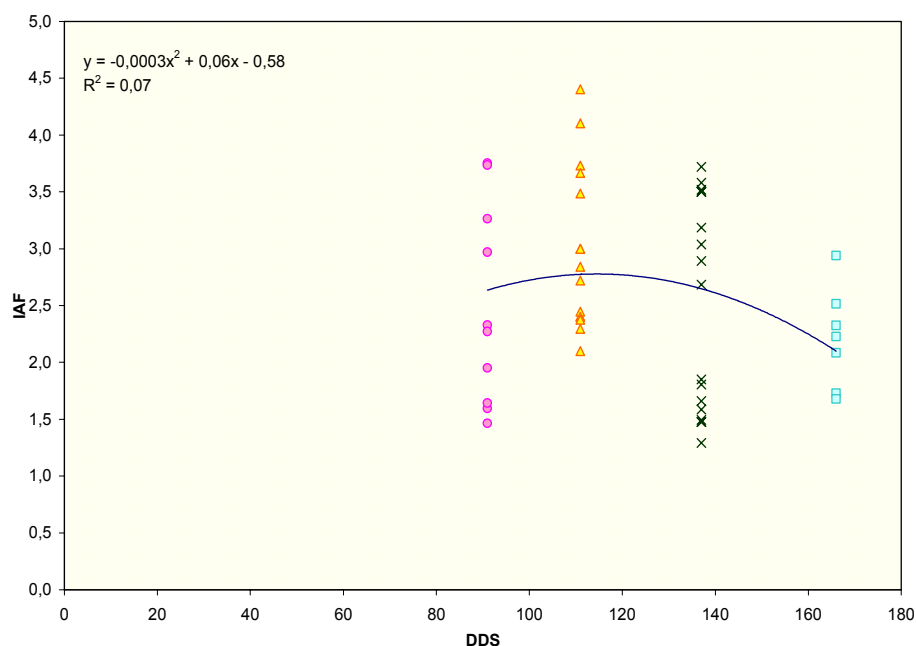
#### 4.6. Observaciones en Forrajera bajo fertilización, tratamiento T4

##### 4.6.1. Variaciones en los muestreos del índice de área foliar

La evolución del índice de área foliar a través del tiempo, presentó un coeficiente de determinación de la regresión de segundo grado poco significativo (gráfico 27), atribuido a las variaciones que se mostraron dentro de cada fecha, es así que a 91

días después de la siembra el rango hallado fue de 1.5 a 3.7, el promedio de 2.5, el (DS) de 0.88 con un (CV) de 35%. A los 111 dds el máximo fue de 3.7 y el mínimo de 1.4, el promedio de 3.0, el (DS) de 0.71 y el (CV) de 24%, a 137 dds los valores extremos son de 1.3 a 3.7, el promedio de 2.5, el (DS) de 0.92 y el (CV) de 37%, por la presencia de follaje en este tratamiento se hizo una evaluación a 166 dds que enseñó un IAF máximo de 2.9 y un mínimo de 1.7 (Anexo 4, cuadro 7).

Las variaciones observadas por fecha y los promedios hallados permiten señalar que el descenso del IAF fue lento, además la variedad forrajera resultó más tardía que la Blanca o la Surumi, y que también su capacidad de ramificación postergo la floración en los ejes secundarios y terciarios, y por consecuencia retraso la fecha de senescencia de las hojas en estos ejes.



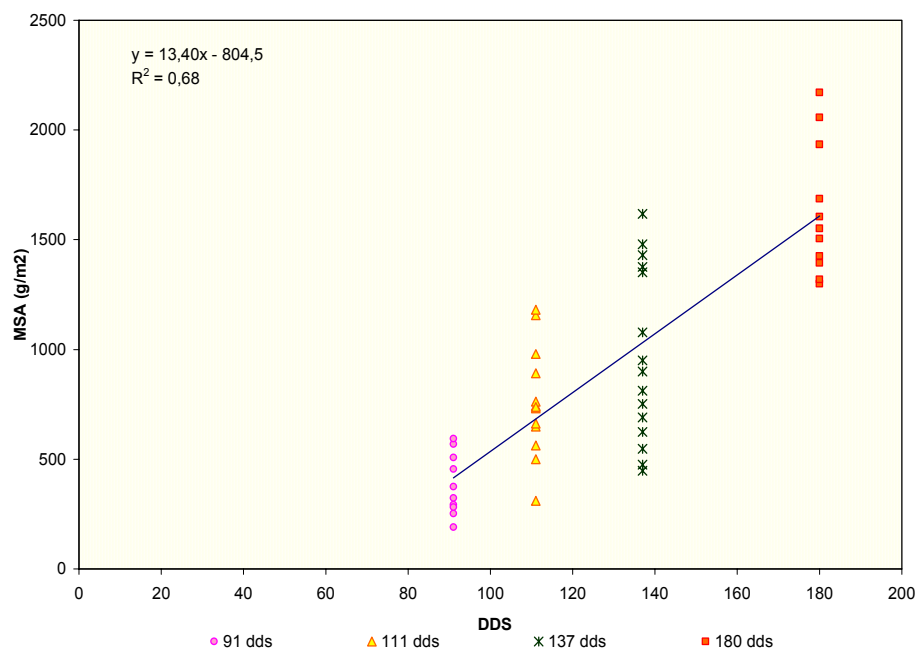
**Gráfico 27. Variaciones del índice de área foliar, tratamiento 4**

#### **4.6.2. Variaciones en los muestreos del crecimiento aéreo**

La evolución de la materia seca aérea MSA en función a los días después de la siembra DDS reportó un coeficiente de determinación de la regresión lineal significativo, además de que este tratamiento experimento incrementos continuos

con el tiempo, también enseñó variaciones de las observaciones en cada fecha (Gráfico 28).

Los valores de MSA a 91 dds fueron de 190.5 g.m<sup>-2</sup> a 594.2 g.m<sup>-2</sup>, cuando a la segunda y tercera evaluación enseñaron rangos más amplios desde 310.0 g.m<sup>-2</sup> a 1180 g.m<sup>-2</sup>, y de 447.4 g.m<sup>-2</sup> a 1376 g.m<sup>-2</sup> respectivamente, finalmente a cosecha el mínimo valor en MSA fue 1299 g.m<sup>-2</sup> y el máximo de 2170 g.m<sup>-2</sup>.



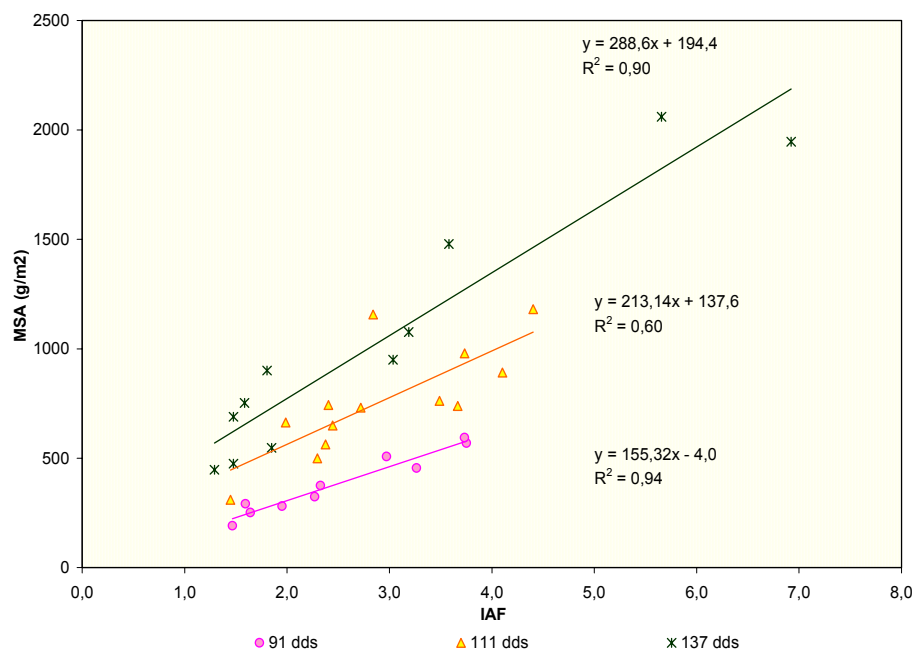
**Gráfico 28. Variaciones en la acumulación de materia seca aérea, tratamiento 4**

#### 4.6.3. Relación entre la materia seca y el índice de área foliar

Para cada fecha de evaluación, el coeficiente de determinación de la regresión lineal establecida entre la MSA en función al IAF fue significativo y altamente significativo, que mostró una relación positiva favoreciendo a ambas variables (Gráfico 29).

Se observó a 91 dds una acumulación mínima en MSA de 190.5 g.m<sup>-2</sup> que corresponde a un IAF de 1.5, la acumulación máxima para esta fecha fue 594.2 g.m<sup>-2</sup> que corresponde a un IAF de 3.7, en panojamiento (111 dds), los valores fueron 310.0 g.m<sup>-2</sup> y 1180 g.m<sup>-2</sup> con IAF de 1.5 y 3.7, finalmente al momento de la cosecha

(181 dds), la acumulación mínima en MSA fue 1299.0 g.m<sup>-2</sup> y la máxima de 2170 g.m<sup>-2</sup> que corresponden a valores de 1.7 y 2.9 respectivamente.

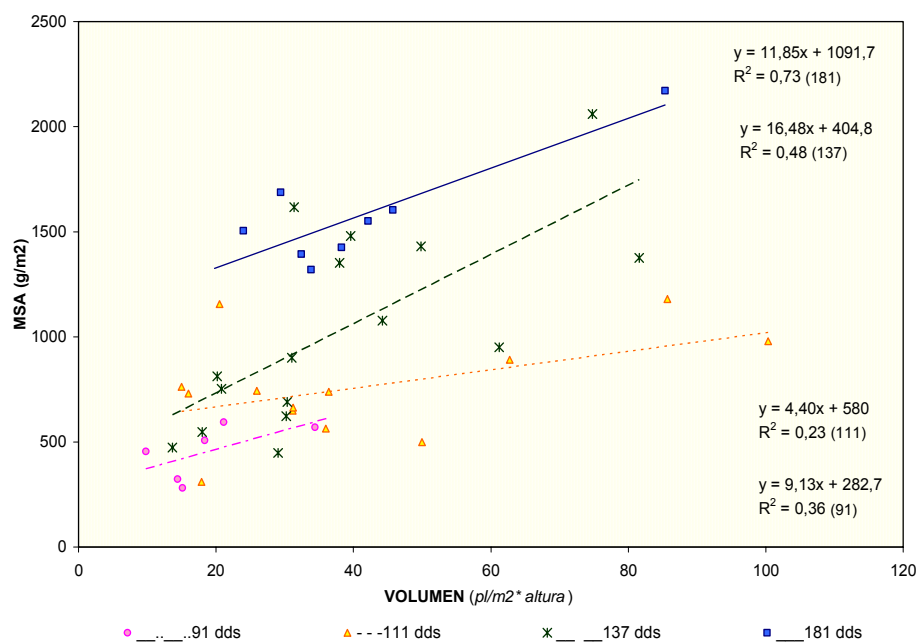


**Gráfico 29. Relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar, tratamiento 4**

#### 4.6.4. Relación entre la materia seca aérea y el volumen

En cada fecha de evaluación el coeficiente de determinación de la relación materia seca aérea MSA en función al volumen fue significativo (Gráfico 30), además enseñan que en la primera evaluación los valores se encuentran cerca de la línea de pendiente, contrariamente a los 111 dds los valores están mas alejados de la línea ajustada para esta fecha.

Las mayores variaciones se presentaron en las dos últimas fechas, así a 137 dds el máximo volumen fue 71.3 y en MSA fue 2060.8 g.m<sup>-2</sup>, que corresponden a una altura del segmento de 0.81 m y una población de 88 pl.m<sup>-2</sup>, los valores mínimos fueron 15.1 y 474.4 g.m<sup>-2</sup>, ambos correspondían a altura del segmento de 0.63 m y a una población de 24 pl.m<sup>-2</sup>. Finalmente a la cosecha se presentó un máximo de 87.1 y 2170.5 g.m<sup>-2</sup>, que corresponden a 0.99 m y 88 pl.m<sup>-2</sup>, y la mínima fue de 17.8 y la MSA fue de 1933.6 g.m<sup>-2</sup> valores que resultan de una altura de 0.89 m y 20 pl.m<sup>-2</sup>.

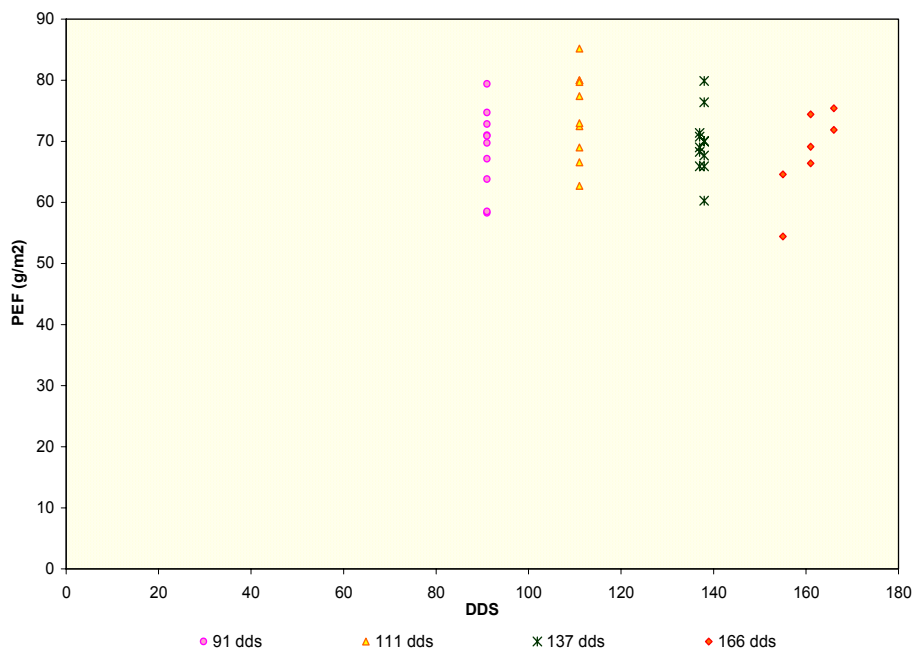


**Gráfico 30. Relación entre la MSA y VOLUMEN, tratamiento 4**

#### 4.6.5. Evolución del peso específico foliar

El peso específico foliar tuvo un comportamiento homogéneo durante su evaluación, reportando a los 91 dds un promedio de  $68.6 \text{ g.m}^{-2}$ , a los 111 dds el promedio fue  $69.9 \text{ g.m}^{-2}$ , a la tercera fecha de  $67.5 \text{ g.m}^{-2}$ , y finalmente a los 137 dds el promedio fue  $68.0 \text{ g.m}^{-2}$ .

También se determinaron los rangos presentes por fecha, a la primera evaluación realizada a 91 dds los valores extremos fueron de  $58.3$  y  $79.4$ , el (DS) de  $6.8$  y el (CV) de  $9\%$ . A la segunda fecha se observó un rango mas amplio desde  $50.8 \text{ g.m}^{-2}$  a  $85.2 \text{ g.m}^{-2}$ , el (DS) fue de  $8.2$  y el (CV) de  $13\%$ , en la tercera fecha (137 dds) el rango fue de  $51.4 \text{ g.m}^{-2}$  a  $80.3 \text{ g.m}^{-2}$ , y en la ultima evaluación del PEF el mínimo fue de  $54.4 \text{ g.m}^{-2}$  y el máximo de  $74.4 \text{ g.m}^{-2}$  (Anexo 5, cuadro 14). La comparación de promedios no mostró diferencias significativas entre fechas (Anexo5, cuadro 15).

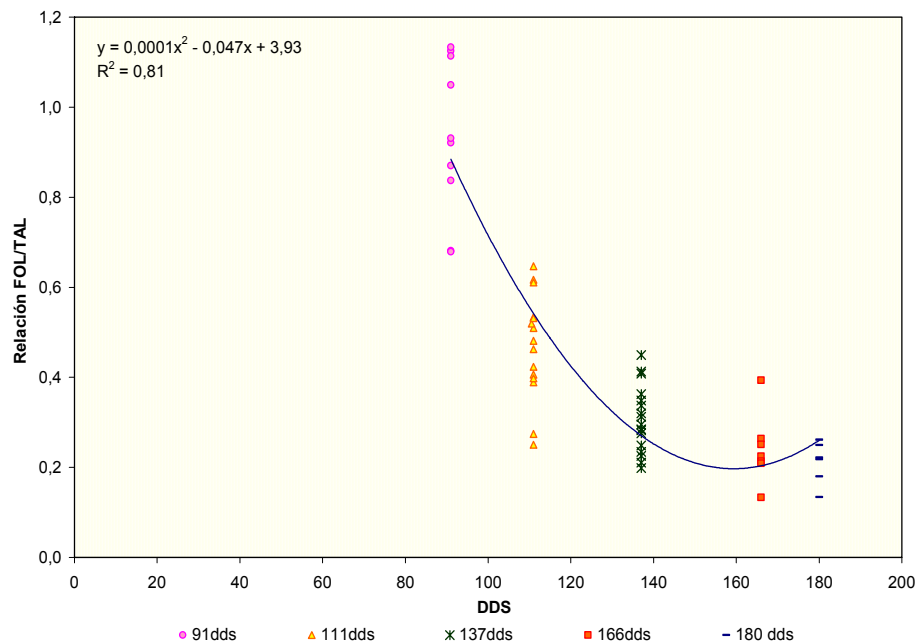


**Gráfico 31. Evolución del peso específico foliar, tratamiento 4**

#### 4.6.6. Evolución de la relación entre hoja y tallo

La relación establecida entre la materia seca foliar FOL y la materia seca del tallo TAL en función a los DDS, presentó un coeficiente de determinación de la regresión de segundo grado altamente significativo, relación que es negativa para la materia seca de hojas FOL (Gráfico 32).

En la primera evaluación la relación favoreció a FOL que llegó a representar al 92% de la materia seca del tallo TAL, con el continuo crecimiento y desarrollo de los demás órganos, a los 111 dds la materia seca de las hojas representó el 45% del TAL, a los 137 dds el coeficiente de la relación disminuyó a 0.30, entonces el FOL constituía el 30% del TAL, a la cosecha FOL representó el 21% de la materia seca del TAL (Anexo 6, cuadro 19). Durante el desarrollo del cultivo se observó la lenta caída de hojas, que fue favorecida por las características forrajeras y al ciclo tardío del presente tratamiento.



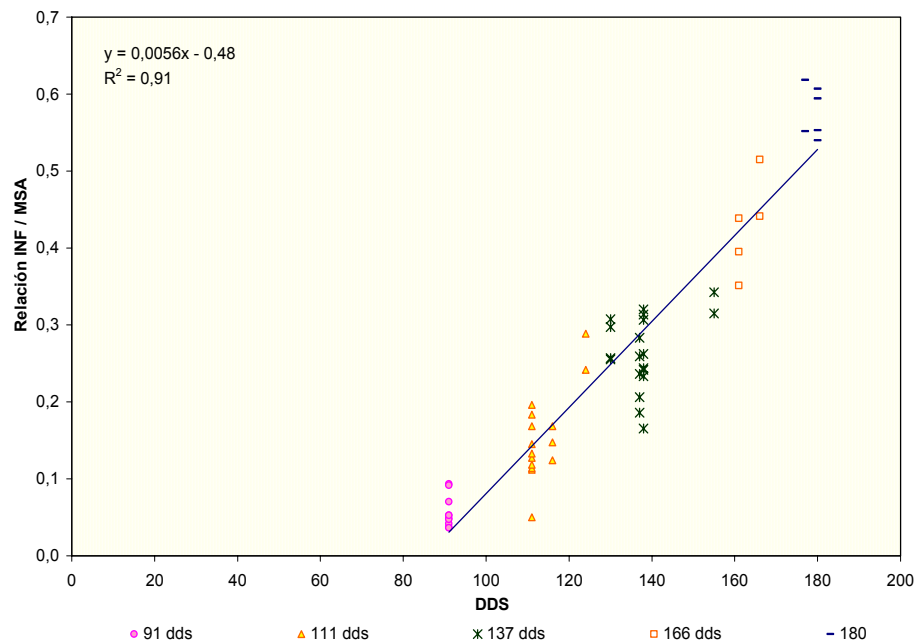
**Gráfico 32. Relación entre hoja y tallo, tratamiento 4**

#### 4.6.7. Evolución de la relación entre inflorescencia y materia seca aérea

La evolución de la relación inflorescencia INF y materia seca aérea MSA en función a los días después de la siembra DDS, enseñó un coeficiente de determinación de la regresión lineal altamente significativo, esta regresión fue positiva para la materia seca de la inflorescencia (Gráfico 33).

Se observó un continuo incremento del coeficiente de la relación entre la materia seca de la inflorescencia INF y la materia seca total aérea MSA a través del tiempo, por ejemplo en panojamiento (91 dds) la INF solo representó el 5.8% de la MSA, se puede considerar que el inicio de la fase reproductiva pudo iniciarse por los 80 dds, luego a 113 dds la INF representó el 18.9% del total de la MSA, y finalmente a la cosecha la relación favoreció aún mas a la inflorescencia que llegó a superar el 57% respecto a la MSA (Anexo 7, cuadro 23).





**Gráfico 33. Relación entre inflorescencia y materia seca aérea, tratamiento 4**

#### 4.6.8. Índice de cosecha

Se había encontrado a la cosecha un coeficiente de 0.57 como resultado de la relación INF/MSA, y que además se hubo determinado un coeficiente de 0.32 entre GRA/INF. Se consideró al 57% como el 100% de materia seca total de inflorescencia, del cual el 32% correspondía al peso de los granos (Anexo 7, cuadro 23).

En consecuencia el tratamiento 4, presentó un índice de cosecha de 0.18 como resultado del producto de la relación INF/MSA y GRA/INF (0.57 y 0.32), índice de cosecha considerado bajo. Pero cabe señalar que la variedad escogida tenía características forrajeras, y que su ciclo era más tardío que las otras dos variedades. Esta variedad no llegó a completar su ciclo por que las heladas destruyeron el cultivo durante su última fase de madurez.

## 5. DISCUSIÓN

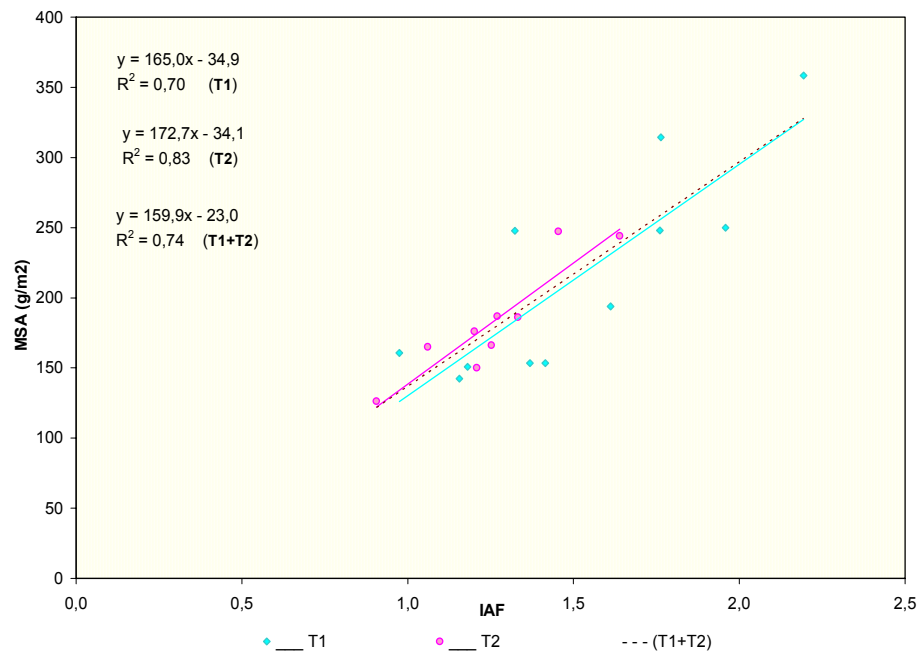
### 5.1. Comparación entre tratamientos

#### 5.1.1. Comparación de la relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar a los 73 dds

Al realizar las comparaciones de las ecuaciones de los tratamientos T1 y T2 a los 73 dds (Cuadro 8), se evidenciaron similitudes en los parámetros  $b$  de la ordenada y en las ordenadas al origen  $a$ . Por lo que se decidió agrupar las observaciones de ambos tratamientos, obteniendo una sola ecuación (Gráfico 34).

**Cuadro 8. Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, reportados a los 73 dds**

Parámetros de regresión	Tratamientos		
	T1	T2	T1+T2
#obs	11	9	20
R <sup>2</sup> (%)	70	83	74
$a$	-34,9	-34,1	-23
$b$	165	172,7	159,9
$Sb$	81,7	69,4	47,2
$Sa$	127,4	88,4	68
Nivel de $\alpha$ %	0,09	0,08	0,01



**Gráfico 34. Expresión de la materia seca aérea en función al índice de área foliar en T1 y T2, a los 73 dds**

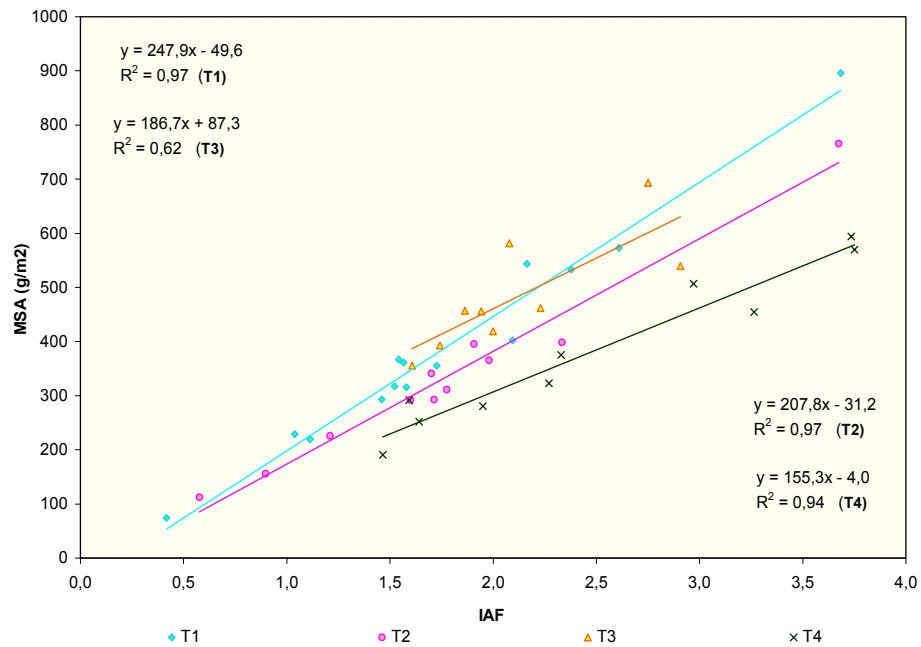
### 5.1.2. Comparación de la relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar a los 90 dds

Los tratamientos T1, T2 y T3, presentaron coeficiente de determinaciones altamente significativas, y además tuvieron un comportamiento similar durante el panojamiento (90 dds). Sin embargo la pendiente 247.9 que correspondía al T1 fue 16% superior al T2 y 25% superior al T3, de igual forma el T1 resulto ser superior en 37% a la pendiente del T4 (Gráfico 35).

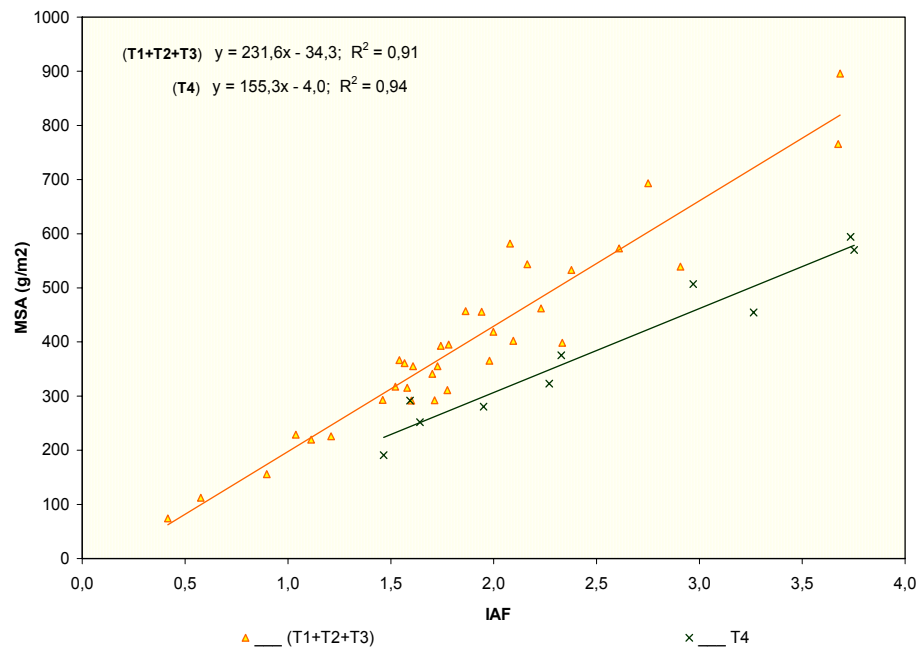
Las pendientes  $b$  de las ecuaciones lineales de regresión de los tratamientos T1, T2 y T3 fueron semejantes, significativas y altamente significativas, esta similitud hallada incito reagrupar las observaciones de estos tres tratamientos para obtener una sola ecuación que resulto también significativa (Cuadro 9), (Gráfico 36). La pendiente  $b$  del T4 difiere significativamente de los anteriores tratamientos: su máximo probable fue de 186.1 (155.3 + 30.8), cuando el mínimo probable de la unión de los tres tratamientos T1, T2 y T3 fue de 205.1 (231.6 – 26.5).

**Cuadro 9. Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, reportado a los 90 dds**

Parámetros de regresión	Tratamientos				
	T1	T2	T3	T4	T1+T2+T3
#obs	14	11	9	10	34
R <sup>2</sup> (%)	97	97	62	94	91
<i>a</i>	-49,6	-31,2	87,3	-4	-34,3
<i>b</i>	247,9	207,8	186,7	155,3	231,6
<i>Sb</i>	26,0	30,0	131,3	30,8	26,5
<i>Sa</i>	50,2	57,3	248,3	81,1	52,7
Nivel de α%	0,01	0,01	0,80	0,01	0,00



**Gráfico 35. Relación de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 90 dds, para T1, T2, T3 y T4**



**Gráfico 36. Expresión de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 90 dds, para (T1, T2, T3) y T4**

### 5.1.3. Comparación de la relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar a los 111 dds

A los 111 dds los coeficientes de determinación de las ecuaciones lineales de las regresiones de los tratamientos T1, T2 y T3 fueron altamente significativos, cuando en el tratamiento T4 la relación fue significativa (Gráfico 37).

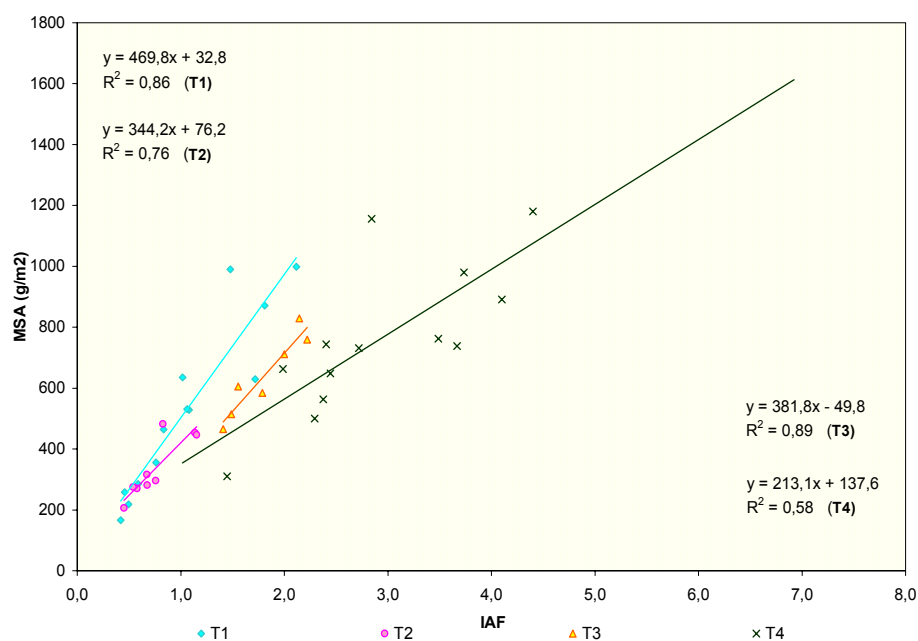
Las pendientes  $b$  de las ecuaciones lineales de los tratamientos T2 y T3 fueron similares, gracias a la similitud hallada se decidió reagrupar estos dos tratamientos para tener una sola ecuación, eliminando 3 puntos que presentaron residuos muy altos en las primeras regresiones (Cuadro 10) (Gráfico 38).

Las pendientes  $b$  de los tratamientos T1 y T4 fueron diferentes entre sí, T1 presentó un mínimo probable de 341.8 (469.8 - 128.0), cuando el T4 presentó un máximo probable de 332.7 (213.1 + 119.6). Estos dos tratamientos parecen también diferenciarse de la unión de los tratamientos de T2 y T3 que presentaron un mínimo

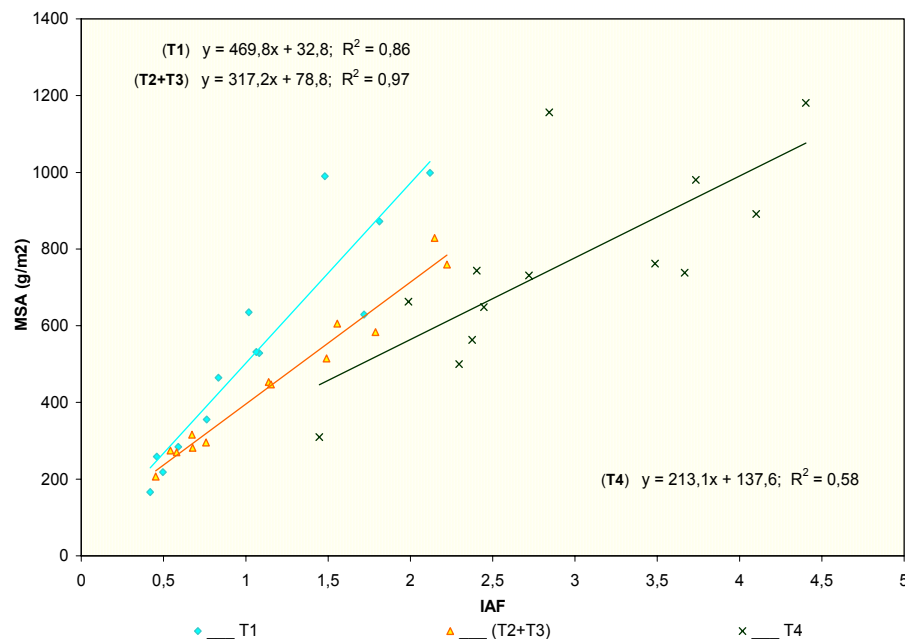
probable de 280.6 (317.2 – 36.6) y un máximo probable de 353.8 (317.2 + 36.6) (Cuadro 10).

**Cuadro 10. Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, reportados a los 111 dds**

Parámetros de regresión	Tratamientos				
	T1	T2	T3	T4	T2+T3
#obs	13	9	7	13	13
R <sup>2</sup> (%)	86	76	86	58	97
<i>a</i>	32,8	76,2	-49,7	137,6	78,8
<i>b</i>	469,8	344,2	381,8	213,1	317,2
<i>Sb</i>	128	196,9	181,7	119,6	36,6
<i>Sa</i>	152,6	155,7	332,0	363,2	47,9
Nivel de α%	0,01	0,20	0,20	0,60	0,00



**Gráfico 37. Relación de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 111 dds, para T1, T2, T3 y T4**



**Gráfico 38. Expresión de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 111 dds, para T1, (T2, T3) y T4**

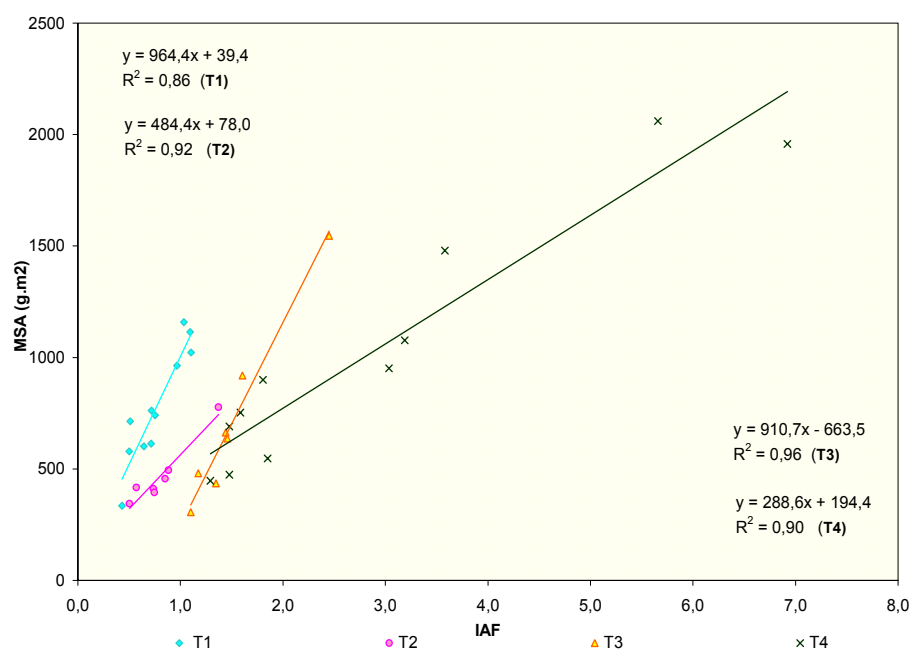
#### 5.1.4. Comparación de la relación entre la materia seca aérea y el índice de área foliar a los 135 dds

Aunque las ecuaciones que correspondían a los tratamientos T2 y T3 parecían diferir entre si, se decidió agrupar las observaciones de estos dos tratamientos para obtener una sola ecuación, del total de los datos se decidió eliminar 5 puntos que presentaron residuos de regresión muy altos en las primeras regresiones, la nueva ecuación obtenida presentó una pendiente intermedia de 617.2, que era intermedia entre los valores de las ecuaciones precedentes, y también intermedia entre las ecuaciones de los tratamientos T1 y T4 (Gráfico 40).

Respecto a las pendientes  $b$  de los tratamientos T1 y T4 se encontraron diferencias significativas, el primero presentó un mínimo probable de 671.2 (964.4 – 293.2), cuando el T4 presentó un máximo de 359.2 (288.6 + 70.6) y que estos dos tratamientos difieren también a la unión de los tratamientos de T2 y T3 que presentaron un mínimo probable de 539.8 (617.2 – 77.4) (Cuadro 11).

**Cuadro 11. Parámetros de regresión de la MSA en función al IAF, reportados a los 135 dds**

Parámetros de regresión	Tratamientos				
	T1	T2	T3	T4	T2+T3
#obs	11	7	7	11	9
R <sup>2</sup> (%)	86	92	96	91	98
<i>a</i>	39,4	78,0	-663,1	194,4	-27,2
<i>b</i>	964,4	484,4	910,5	288,6	617,2
<i>Sb</i>	293,2	161,4	207,3	70,6	77,4
<i>Sa</i>	236	137,5	324,7	240,2	95,3
Nivel de α%	0,01	0,05	0,04	0,01	0,01



**Gráfico 39. Relación de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 135 dds, para T1, T2, T3 y T4**



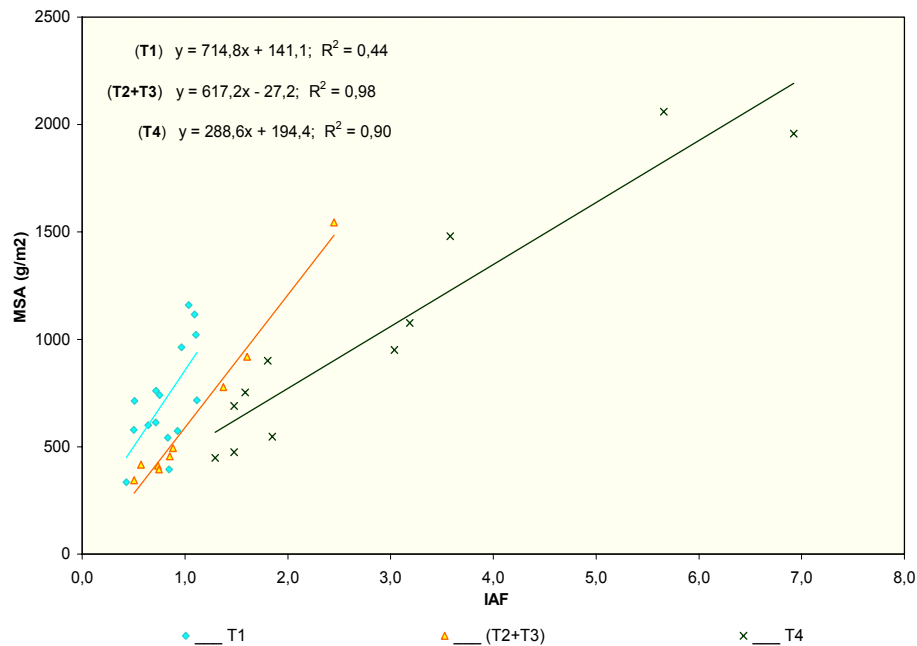


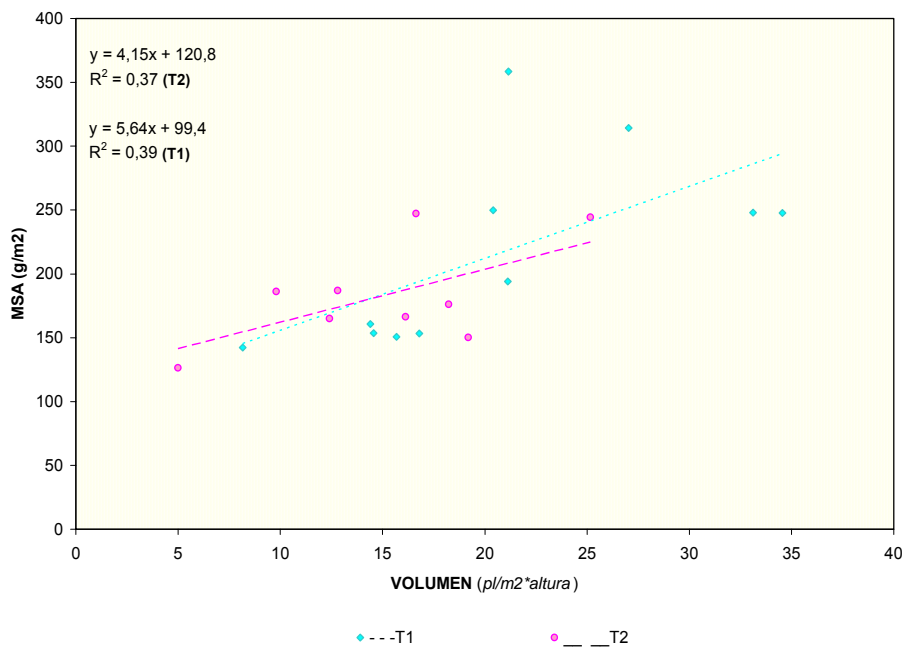
Gráfico 40. Expresión de la materia seca aérea en función al índice de área foliar a los 135 dds, para T1, (T2, T3) y T4

## 5.2. Relación de la materia seca aérea y volumen

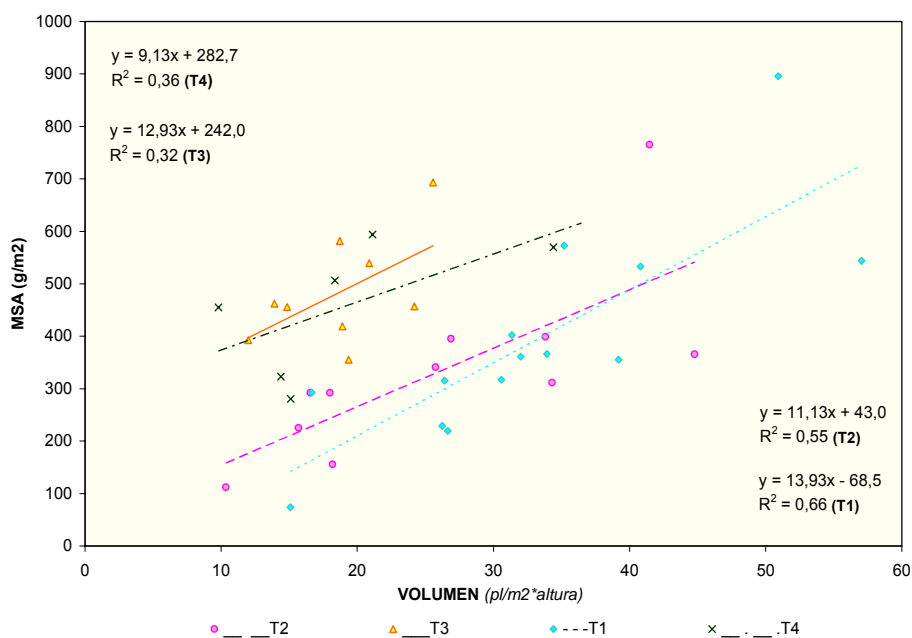
La relación entre la MSA y el volumen a los 73 dds presentaron pendientes casi similares en los tratamientos T1 y T2, se llegó a esa determinación luego de comparar el coeficiente  $b$  de ambas ecuaciones (Gráfico 41) A los 90 dds las ecuaciones del T1 y T2 difieren significativamente de las ecuaciones del T3 y T4, no por las pendientes pero si por las ordenadas al origen. A un volumen dado de cultivo, T3 y T4 presentaron una mayor acumulación de materia seca aérea (Gráfico 42).

A los 111 dds, permanecía la similitud entre las ecuaciones del T3 y T4 (Gráfico 43), el paralelismo relativo del T1, y un comportamiento intermedio del T2 respecto a los anteriores, cuyos valores inferiores coincidían con la ecuación de T1, y cuyos valores superiores se aproximaban a las ecuaciones del T3 y T4. Las observaciones a los 135 dds muestran nuevamente un parecido entre T1 y T2, que se diferencian significativamente de los tratamientos T3 y T4. Los coeficientes  $b$  de las ecuaciones

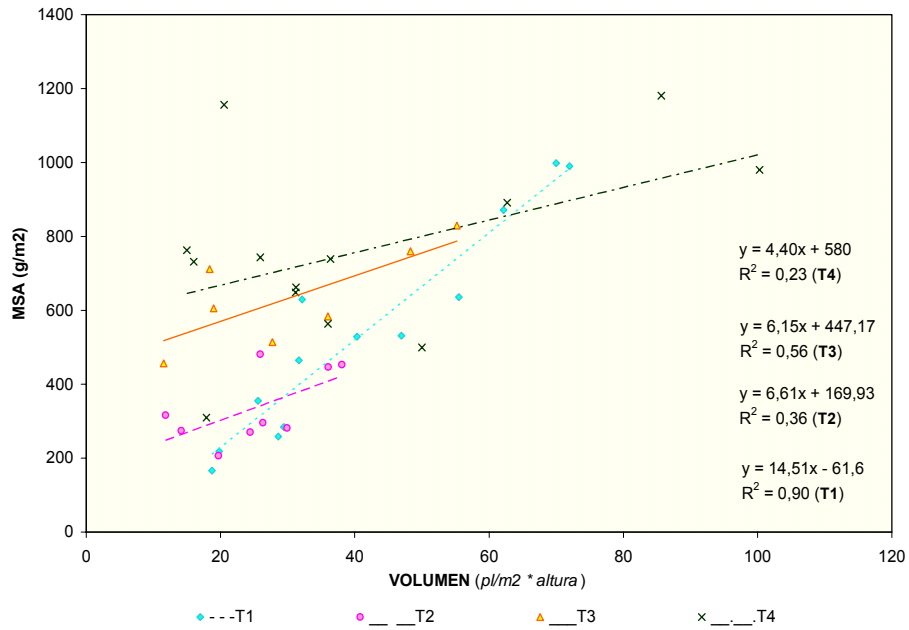
lineales de las regresiones del T1 y T2 presentan similitud y además son inferiores a los tratamientos T3 y T4 (Gráfico 44).



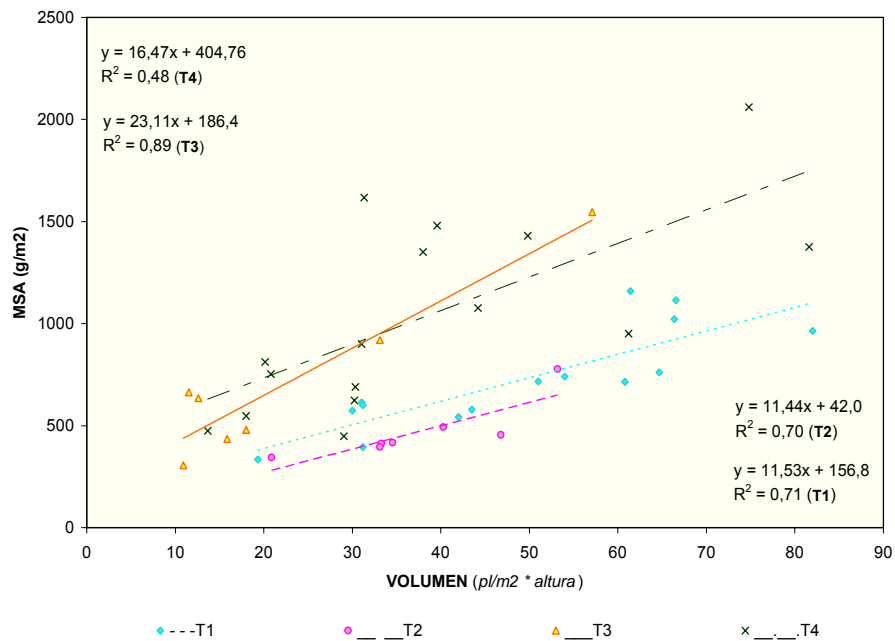
**Gráfico 41. Comparación de la relación MSA y VOLUMEN entre los tratamientos T1 y T2 a los 73 dds**



**Gráfico 42. Comparación de la relación MSA y VOLUMEN entre tratamientos a los 90 dds**



**Gráfico 43. Comparación de la relación MSA y VOLUMEN entre tratamientos a los 111 dds**



**Gráfico 44. Comparación de la relación MSA y VOLUMEN entre tratamientos a los 135 dds**

### 5.3. Comparación del peso específico foliar entre tratamientos

El tratamiento T1 tuvo un promedio general del peso específico de  $81.9 \text{ g.m}^{-2}$ , para T2 el promedio fue  $85.1 \text{ g.m}^{-2}$ , en el T3 el promedio fue  $92.4 \text{ g.m}^{-2}$ , finalmente en el T4 se reportó un promedio de  $68.5 \text{ g.m}^{-2}$ . La diferencia de medias determinó que no hubo diferencias entre los tratamientos T1, T2 y T3, pero estas tres resultaron superiores al T4. (Gráfico 45). Sin embargo dentro de los tratamientos T1, T2 y T4 no se observaron diferencias significativas del PEF entre fechas de muestreo, pero si hubo diferencias significativas del PEF en el T2 entre la segunda y tercera fecha de evaluación.

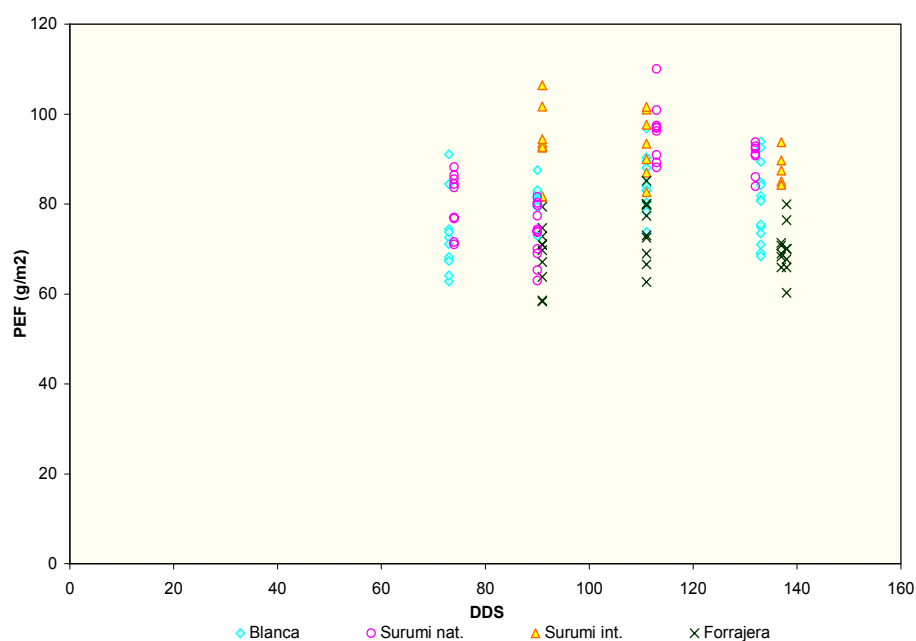


Gráfico 45. Comparación del peso específico foliar entre tratamientos

### 5.4. Comparación de la evolución entre la relación hoja y tallo entre tratamientos

Para cada tratamiento y para cada fecha de evaluación, el coeficiente de determinación de la regresión establecida entre la relación hoja y tallo FOL/TAL en función a los días después de la siembra DDS fueron altamente significativas (Gráfico 46).

La característica forrajera del T4 determinó la superioridad de la relación FOL/TAL a partir de los 90 dds sobre los tratamientos T1, T2 y T3. Pero la ausencia de observaciones en T3 y T4 antes de los 90 dds no permite comprobar la significancia de esta superioridad.

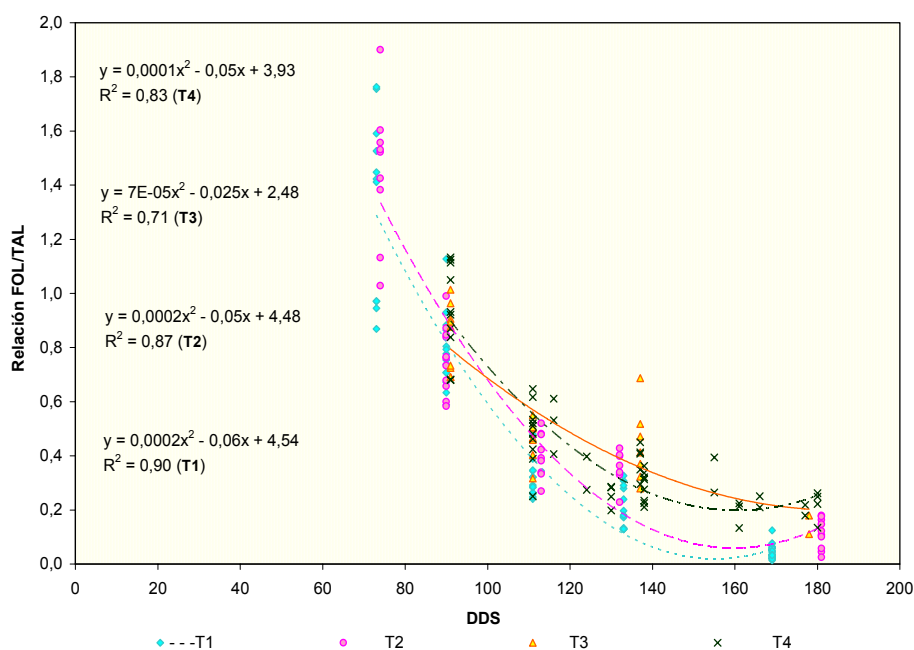


Gráfico 46. Comparación de la relación hoja y tallo entre tratamientos.

## 5.5. Índice de cosecha

Los valores de IC obtenidos para los tratamientos T1, T2 y T3 están dentro del rango mencionado para el caso de la quinua (Huiza, 1994). El IC de la variedad Forrajera T4 puede estar dentro de los valores aceptables, por ser un tratamiento de características forrajeras, y no como productor de grano exclusivamente.

El tratamiento T1 registró un rendimiento promedio de 2.5 t.ha<sup>-1</sup> en grano. En el tratamiento T2 el rendimiento fue de 2.4 t.ha<sup>-1</sup>. Para el tratamiento T3 el valor obtenido fue de 3.0 t.ha<sup>-1</sup>. Finalmente el T4 registró un valor de 2.6 t.ha<sup>-1</sup>, a pesar de que en este tratamiento pocas plantas llegaron a la madurez total.

## 5.6. Evolución de la tasa de materia seca aérea

La tasa de MSA es el cociente de la relación entre la materia seca aérea y la materia verde (fresca), presentó una diferencia mínima entre tratamientos llegando a 0.12, a la segunda evaluación se observaron diferencias poco significativas que fueron 0.15 para los tratamientos T1 y T2 y 0.14 para T3 y T4. A la tercera evaluación (111 dds), se encontró una mínima diferencia que fue de 0.17 a 0.20. A los 135 dds los tratamientos T2 y T3 presentaron mayor variación en comparación al T1 y T4, sin embargo se observó una tasa similar entre T1 y T2 con valores de 0.23 y 0.24, cuando los tratamientos de T3 y T4 presentaron valores de 0.19 y 0.20 respectivamente.

Esta evaluación determinó que, en los muestreos no hubo muchas variaciones respecto a la humedad, y que pudo realizarse relaciones tanto con la materia seca aérea como también con materia fresca o verde, ya que durante las primeras evaluaciones determinaron poca diferencia. La tasa de materia seca presentó un incremento con el desarrollo del cultivo, y una mayor tasa para los tratamientos T1 y T2 respecto a los tratamientos T3 y T4 (Gráfico 47).

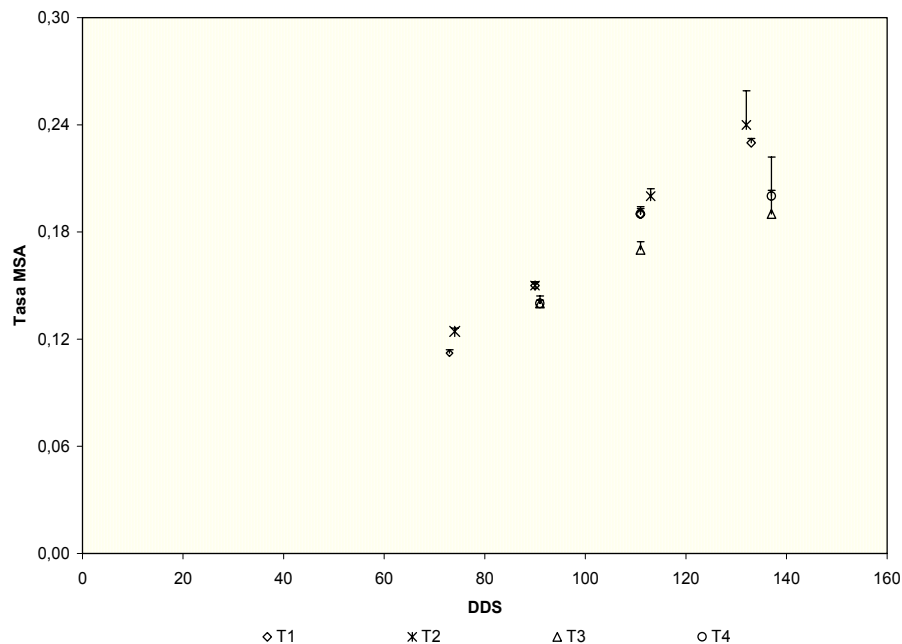


Gráfico 47. Evolución de la tasa de MSA, en los cuatro tratamientos

## 5.7. Relación del crecimiento con el IAF; observaciones y simulaciones

### 5.7.1. Comparaciones a los 73 dds

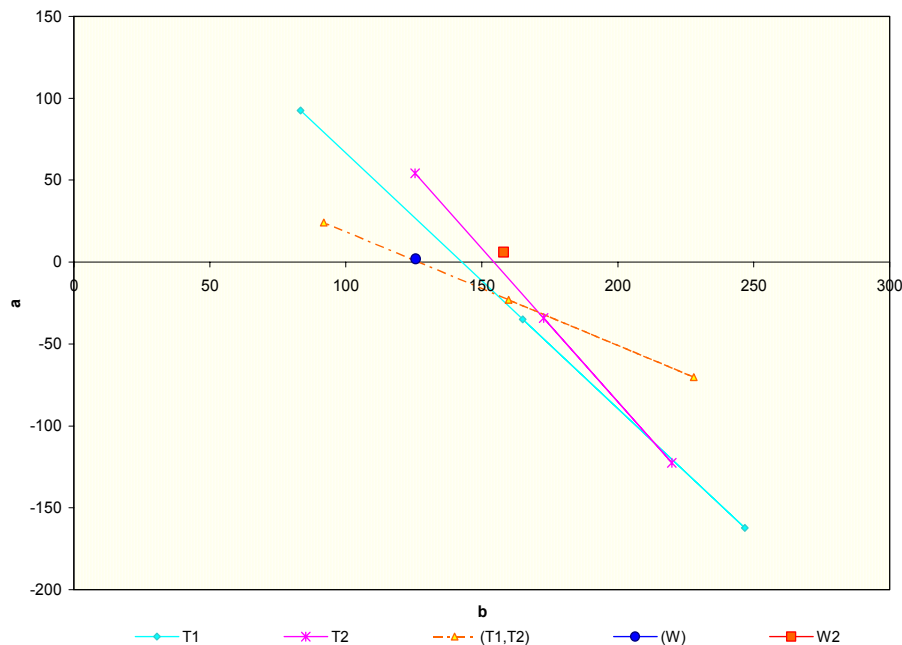
Los componentes de la ecuación de la regresión lineal  $a$  y  $b$  de las ecuaciones obtenidas a los 73 dds y de la unión de los tratamientos (T1, T2) se comparo con los coeficientes de la ecuación wofost ( $w$ ) obtenida mediante simulación estándar y con la simulaciones wofost con modificaciones ( $W_2$ );

$$(T1, T2) \rightarrow MSA = 1599 * IAF - 23.0 \quad (1)$$

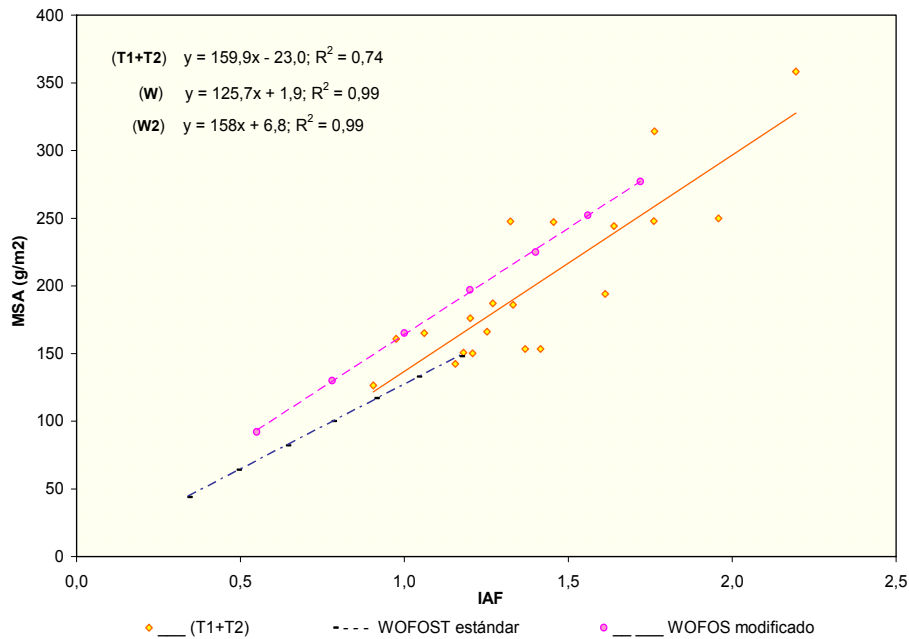
$$(W) \rightarrow MSA = 1257 * IAF + 1.9 \quad (2)$$

$$(W_2) \rightarrow MSA = 158 * IAF + 6 \quad (3)$$

La confrontación de los componentes  $a$  y  $b$  de las tres ecuaciones determinaron que los coeficiente  $b$  de la ecuación 2 y 3 estuvieron dentro del rango establecido por la ecuación 1, por presentar un desvío estándar de  $b \pm 47.2$  y de  $a \pm 68.0$  (Gráfico 48). El análisis de los componentes de regresión determinaron que a los 73 dds, la pendiente de ( $W$ ) y la pendiente de ( $W_2$ ) fueron similares a la pendiente de la unión de los tratamiento (T1, T2) (Gráfico 49).



**Gráfico 48. Comparación de los coeficientes de regresión de la MSA en función al IAF, a los 73 dds**



**Gráfico 49. Comparación con el modelo de simulación WOFOST a los 73 dds**

### 5.7.2. Comparación a los 90 dds

Se determinó la semejanza del comportamiento de los tratamientos T1, T2 y T3 a los 90 dds y la diferencia muy marcada con el T4 (Gráfico 36), obteniéndose las ecuaciones 4 y 5 que se compararon con la ecuación 6 obtenida mediante simulación (W) y la ecuación 7 obtenida de la simulación con modificaciones (W<sub>2</sub>):

$$T1, T2, T3 \rightarrow MSA = 231.6 * IAF - 34.3 \quad (4)$$

$$T4 \rightarrow MSA = 155.4 * IAF - 4.0 \quad (5)$$

$$(W) \rightarrow MSA = 172.3 * IAF + 8.9 \quad (6)$$

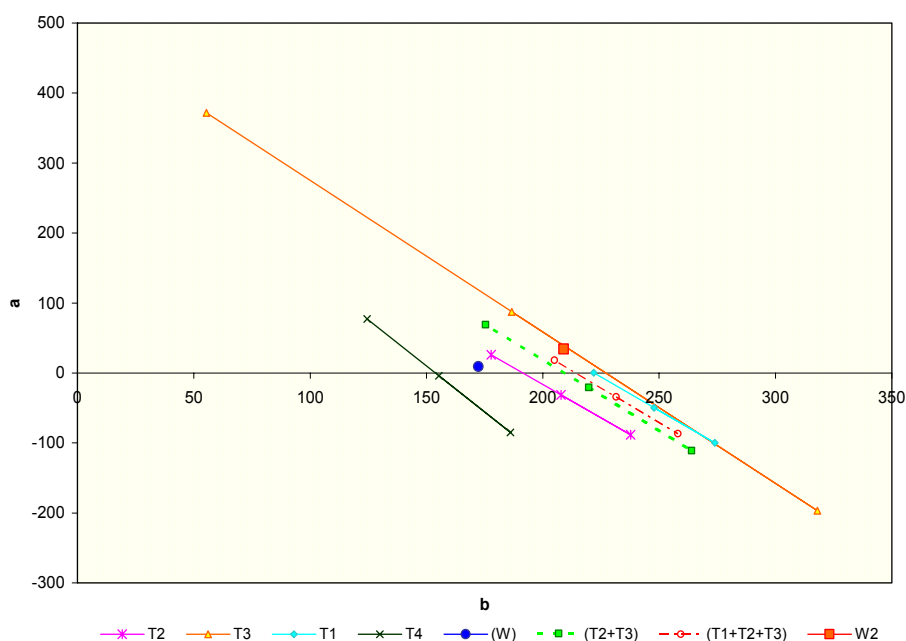
$$(W_2) \rightarrow MAS = 209 * IAF + 34 \quad (7)$$

Se realizó la comparación entre el coeficiente  $b$  de la ecuación 6 y el coeficiente de  $b$  de la ecuación 4. Este último presentó un desvío estándar de  $b \pm 26.5$  y de  $a \pm 52.7$ . Esto condujo a evidenciar que (W) no tuvo la misma pendiente que la unión de los tres tratamientos (T1, T2 y T3), pero estos tres tratamientos presentaron una pendiente similar a la pendiente de (W<sub>2</sub>).

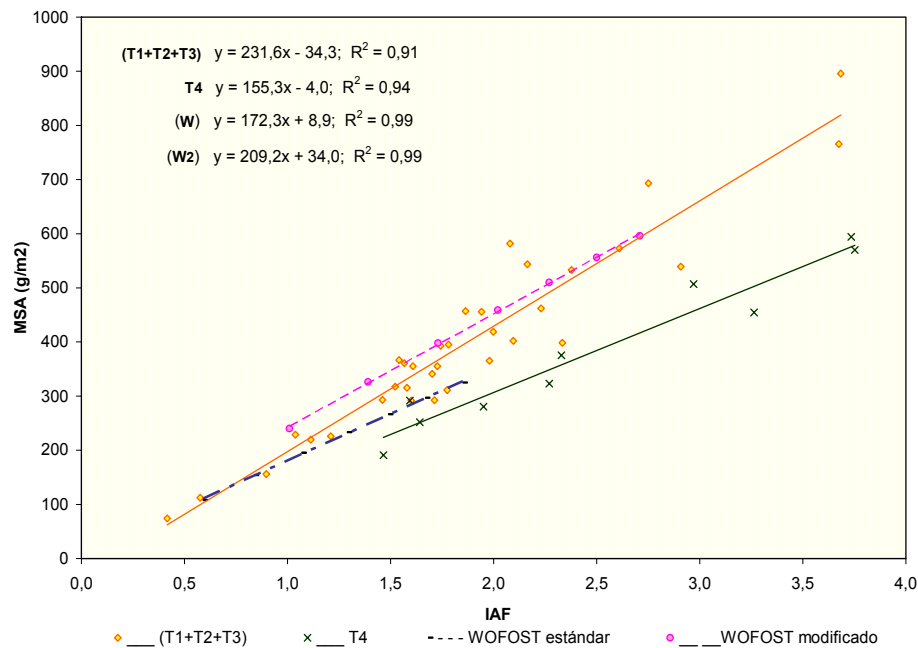


El coeficiente  $b$  de la ecuación 6 también se comparo con  $b$  de la ecuación 5, que presentó un desvío estándar de  $b \pm 30.8$  y de  $a \pm 81.1$ , la comparación condujo a determinar que la pendiente establecida por las observaciones del tratamiento T4 se aproximó a la establecida por simulación con el modelo estándar wofost (W) pero que fue diferente a la simulación con modificaciones (W<sub>2</sub>) (Gráfico 50).

La comparación de los diferentes coeficientes, determinó la unión de los tres tratamientos (T1, T2 y T3) que resultó similar a (W<sub>2</sub>), y que estos fueron superiores al T4 y también superiores a (W). Luego el tratamiento T4 y (W) fueron semejantes (Gráfico 51).



**Gráfico 50. Comparación de los coeficientes de regresión de la MSA en función al IAF, a los 90 dds**



**Gráfico 51. Comparación con el modelo de cultivo WOFOST, a los 90 dds**

### 5.7.3. Comparación a los 111 dds

A 111 dds, los tratamientos T2 y T3 tuvieron comportamientos similares, obteniendo una nueva ecuación de regresión, que fue diferente a los tratamiento T1 y T4 (Gráfico 38), las nuevas ecuaciones obtenidas y las reportadas, se compararon con la ecuación estándar wofost (W) y la obtenida mediante modificaciones (W<sub>2</sub>):

$$T1 \rightarrow MSA = 469.83 * IAF + 32.8 \quad (8)$$

$$(T2,T3) \rightarrow MSA = 317.2 * IAF + 78.8 \quad (9)$$

$$T4 \rightarrow MSA = 213.1 * IAF + 137.6 \quad (10)$$

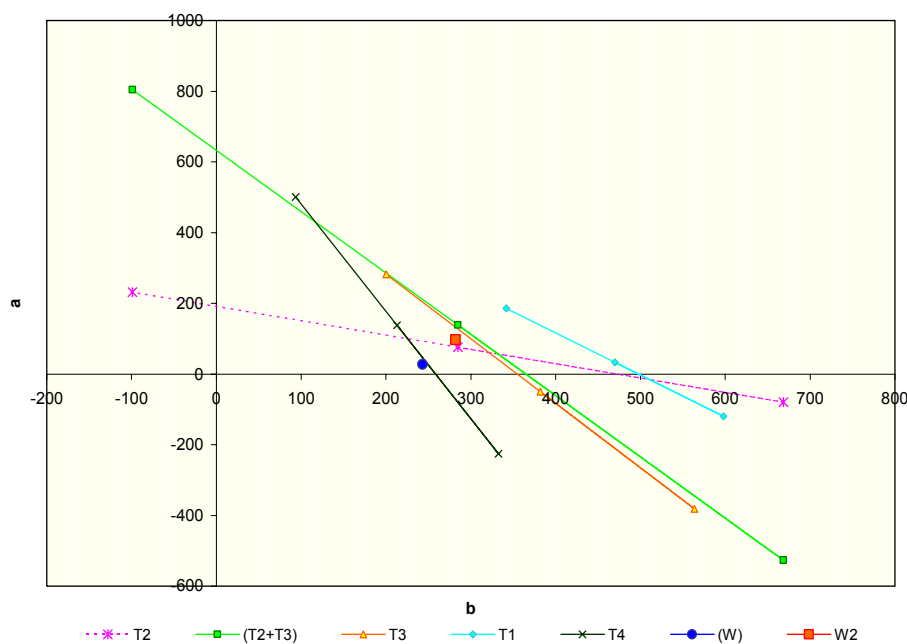
$$(W) \rightarrow MSA = 243.0 * IAF + 27 \quad (11)$$

$$(W_2) \rightarrow MSA = 282 * IAF + 97 \quad (12)$$

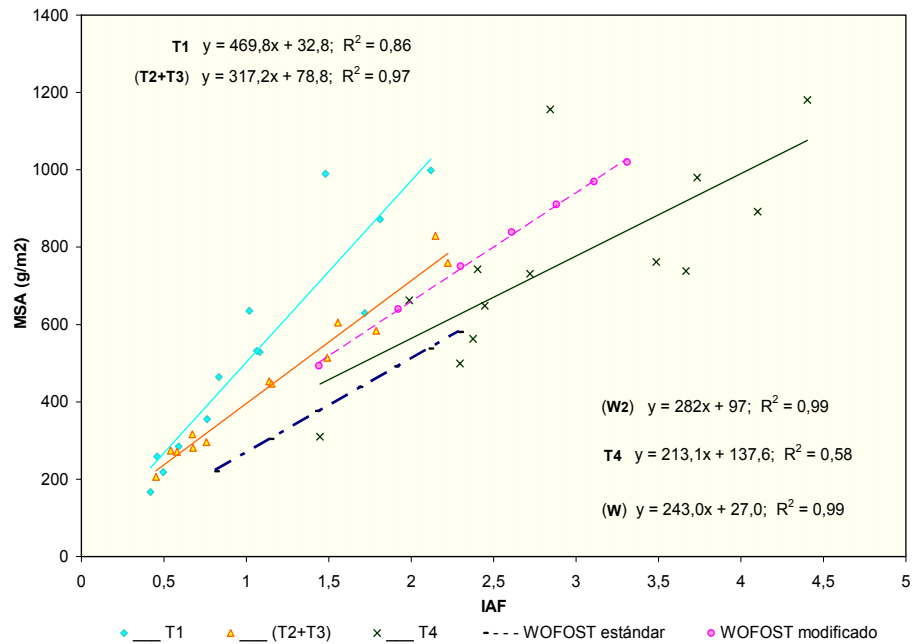
La comparación de los coeficientes  $a$  y  $b$  de las ecuaciones ajustadas, y también de la ecuación simulada se observan en el gráfico 52. Asimismo, se realizó una primera comparación entre la pendiente  $b$  de las ecuaciones 11 y 12 con la pendiente  $b$  de la ecuación 8, este último reportó un desvío estándar de  $b \pm 127.95$  y de  $a \pm 152.62$ , que determino que entre el T1, (W) y (W<sub>2</sub>) no hubo ninguna semejanza.

En la segunda comparación, se evidenció que los coeficientes  $b$  de las ecuaciones 11 y 12 estuvieron mas alejada al coeficiente  $b$  de la ecuación 9 por que presentó un desvío estándar de  $b \pm 36.5$  y de  $a \pm 47.95$ , entonces T2 y T3 fueron superiores al obtenido por wofost (W) y a (W<sub>2</sub>). Finalmente se comparó  $b$  de la ecuación 11 con  $b$  de la ecuación 10, este último presentó un desvío estándar de  $b \pm 119.58$  y de  $a \pm 363.23$ , lo que determinó la similitud entre el tratamiento T4 y wofost (W) y la clara diferencia con (W<sub>2</sub>) (Gráfico 52).

El análisis realizado a los coeficientes de la ecuación de regresión, contribuyo a determinar la superioridad del T1 sobre la unión de los tratamientos (T2 y T3) y de este sobre el tratamiento T4, sobre (W) y (W<sub>2</sub>). También se evidencio la semejanza existente entre T4 y wofost (W) (Gráfico 53).



**Gráfico 52. Comparación de los coeficientes de regresión de la MSA en función al IAF, a los 111 dds**



**Gráfico 53. Comparación con el modelo de simulación WOFOST, a los 111 dds**

#### 5.7.4. Comparación a los 135 dds

Se había determinado a los 135 dds un comportamiento similar entre los tratamientos T2 y T3 y la diferencia muy marcada con T1 y T4. De los cuales resultaron nuevas ecuaciones que se presentan a continuación:

$$T1 \rightarrow MSA = 964.4 * IAF + 39.4 \quad (13)$$

$$(T2, T3) \rightarrow MSA = 372.0 * IAF + 123.1 \quad (14)$$

$$T4 \rightarrow MSA = 288.6 * IAF + 194.4 \quad (15)$$

$$(W) \rightarrow MSA = 391.2 * IAF + 32.5 \quad (16)$$

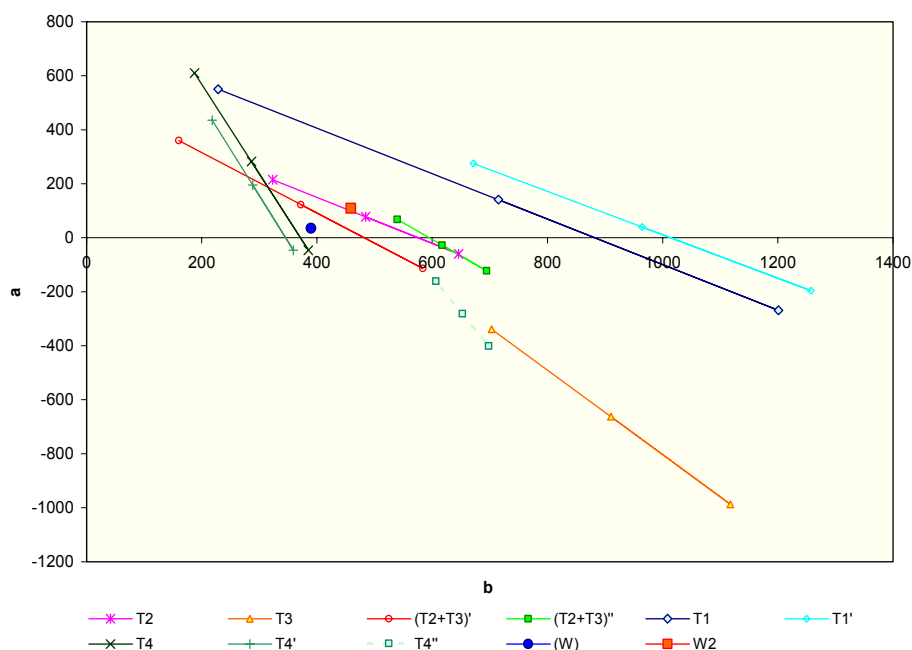
$$(W_2) \rightarrow MSA = 459 * IAF + 109 \quad (17)$$

Las comparaciones de los coeficientes de regresión  $b$ , así como de la ordenada al origen  $a$ , nos ayudo a determinar el comportamiento de cada tratamiento respecto al simulado (Gráfico 54).

Se realizaron comparaciones con las pendientes de las ecuaciones 16 y 17, primero se comparó con la pendiente  $b$  de la ecuación 13 que correspondía al T1, presentó

un rango de  $b \pm 293.2$  y de  $a \pm 236.0$ , por tanto la pendiente  $b$  de la ecuación de (W) y (W2) estuvieron muy alejados al rango presentado por este tratamiento. La segunda comparación se realizó con la ecuación 14 que corresponde a la unión de T2 y T3, este presentó un rango de  $b \pm 77.4$  y de  $a \pm 95.3$ , determinando que las pendientes  $b$  de las ecuaciones simuladas estuvieron muy alejadas al rango establecido por la pendiente  $b$  de la ecuación obtenida de la unión de ambos tratamientos.

Finalmente las pendientes  $b$  de las ecuaciones simuladas fueron inferiores a la pendiente  $b$  de la ecuación 15, por que este último presentó un rango para  $b \pm 70.6$  y para  $a \pm 240.2$  (Gráfico 54).

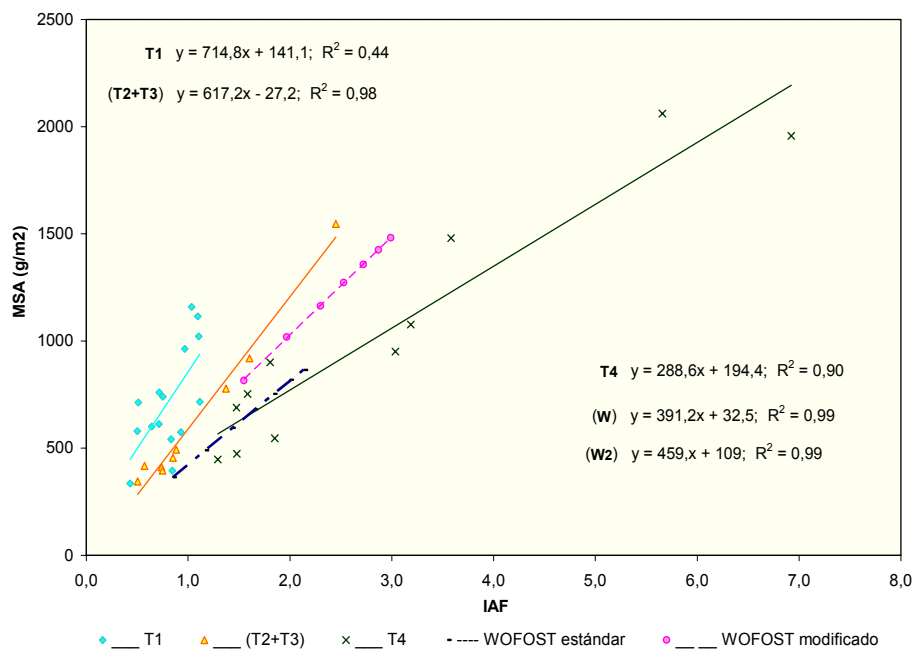


**Gráfico 54. Comparación de los coeficientes de regresión de la MSA en función al IAF, a los 135 dds**

Se determinó que las pendientes  $b$  de las ecuaciones de la simulación estándar y la simulación con modificaciones, no correspondía a ninguno de los rangos de las pendientes  $b$  de las ecuaciones de los tratamientos T1, a la unión de (T2 y T3) y T4.

Concluyendo que el T1 fue superior a la unión de (T2, T3) y al T4 que resultaron ser superiores a (W) y a (W2) (Gráfico 55).

Para establecer relaciones entre la pendiente  $b$  y la ordenada al origen  $a$  para los cuatro tratamientos a los 135 dds, se tuvieron que realizar con los datos observados y con omisión de algunos valores por presentar residuos muy altos en las regresiones de las ecuaciones observadas, razón por lo que se observan varias relaciones de  $a$  y  $b$  (obsérvese el Gráfico 54).



**Gráfico 55. Comparación con el modelo de simulación WOFOST, a los 135 dds**

## 6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La relación significativa encontrada entre la MSA y el volumen, variable que es producto de la densidad por la altura, para los diferentes tratamientos y en cada fecha de evaluación, permite realizar estimaciones de la MSA con un método no destructivo. Pero las variaciones encontradas en los parámetros de las ecuaciones de regresión obligan a calibrar esta relación en cada circunstancia.
- Tres Tratamientos tuvieron comportamientos similares en ciertos aspectos y diferencias en otros. Blanca y Surumi presentaron similitudes en el PEF, en las relaciones FOL/TAL y en INF/MSA y en el índice de cosecha.
- La variedad Forrajera presentó un PEF menor, una relación FOL/TAL mayor y una relación INF/MSA menor a la cosecha, y un índice de cosecha también inferior.
- Sobre la relación MSA/volumen las variedades Surumi y Forrajera resultaron superiores a la local Blanca respecto a la acumulación de MSA.
- Respecto a la relación MSA en función al IAF, en cada variedad y en cada fecha de evaluación, los coeficientes de determinación fueron significativos o altamente significativos.
- Con el transcurso del tiempo se evidenció una diferencia de la pendiente de la relación lineal MSA en función del IAF entre variedades y entre simulaciones.

- Las ecuaciones obtenidas en el caso de la variedad Forrajera se aproximaron a las ecuaciones proporcionadas con las simulaciones estándar.
- La variedad Surumi presentó ecuaciones parecidas al obtenido con las simulaciones con modificaciones del peso específico foliar y la eficiencia de asimilación de CO<sub>2</sub> de las hojas.
- La variedad local Blanca presentó una pendiente superior a las pendientes de las otras variedades a partir de la segunda fecha de evaluación, es decir a partir de la fase de panojamiento. Esta pendiente encontrada con la variedad Blanca en la fase de panojamiento era compatible con lo estimado con la simulación modificada por el peso específico foliar y la eficiencia de asimilación de CO<sub>2</sub> de las hojas. No se pudo encontrar modificaciones de parámetros del modelo de simulación que permitan explicar las pendientes mayores de la relación MSA en función al IAF en la fase de plena floración y de inicio de llenado de grano.
- Aunque la variedad forrajera presentó características de menos eficiencia para transformar la radiación interceptada en materia seca aérea que las otras dos variedades, enseñó un mayor potencial de acumulación de materia seca aérea por su facultad de ramificar y a producir un mayor dosel foliar.



## 7. RECOMENDACIONES

- Es menester considerar las labores previas a la siembra, para lograr una homogeneidad de condiciones para el cultivo. De manera complementaria sería útil entender los factores que provocaron las heterogeneidades de vigor del cultivo.
- Es importante advertir que la modificación de los parámetros establecidos por el modelo WOFOST deba realizarse en base a estudios precisos para establecer y comprobar su estabilidad, puesto que fácilmente puede generar resultados alejados de la realidad.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, se sugiere continuar con investigaciones en este campo, bajo diferentes condiciones ambientales (radiativas y edáficas) con el propósito de comprobar la similitud de los parámetros y su posterior estabilidad para la calibración del modelo WOFOST.
- Se pueden realizar más trabajos al respecto, no solo para la calibración de WOFOST, sino también para calibrar otros modelos que son mas sofisticados que tienen la capacidad de simular relaciones de producción en base a la nutrición mineral y la incidencia de plagas, para que en lo posterior puedan ser estudiadas, explotadas y aplicadas a otros niveles de producción vegetal.

## 8. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AGRODATA 2001. Mercado de alimentos en Bolivia. PASA, USAID COSUDE. La Paz, Bolivia. 32 p.

ÁVILA, P.; ETCHEVERS, J. 1988. Efecto de la profundidad de siembra y de la fertilización N, P, K sobre la emergencia y producción de materia seca y composición química de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *In* Agrociencia. Chillán, Chile. p. 5 – 10.

BEADLE, C. L.; LONG, S.; ROBERTS, M.; TIESZEN, L. 1988. Análisis del crecimiento vegetal. *In* Técnicas de fotosíntesis y bioproductividad. Coombs *et al.* Trad. de Ingles por garcía Moya. Colegio de postgraduados Estado de México. Chapingo, México. p. 17 – 21.

BENINCASA, M. P. 1988. Análisis de crecimiento de plantas. Departamento de biología aplicada. Jacobital. FUNEP. Brasil. 42 p.

BERMUDEZ, M.; DELGADILLO, A.; GERMAIN, N. 1994. Producción potencial de cultivos C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub> en los valles de Cochabamba. *In* Seminario taller sobre investigaciones y aplicaciones meteorológicas en América Central y América del Sur. AGROMET 94. SENAMHI, ORSTOM, OMM. La Paz, Bolivia.

BERTI, M.; HEVIA, F.; MÉNDEZ, C.; SERRI, H.; VIDAL, I.; WILCKENS, E. 1997. Fertilización nitrogenada en quínoa (*Chenopodium quínoa* Willd.). Universidad de Concepción, Facultad de agronomía Chillán, Chile. s/p.

BERTSCH, H. F. 1995. La planta en la nutrición vegetal. *In* La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo ACCS, 1995. 1ª ed. San José, Costa Rica. p. 9 – 14.

BEUKEMA, H. P.; ZAAG van der, D.E. 1990. Introduction to the potato production. Center for Agricultural Publishing and documentation (PUDOC). Wageningen, Holanda. 207p.

- BIDWELL, R. G. S. 1987. Fisiología vegetal. Traducción de la 2da. ed. en Ingles por Gerónimo Cano y Cano. A. G. T. D.F, México. 784 p.
- BLANCO, C. 1988. Factores abióticos adversos. *In* La quinua como se debe cultivar. Universidad técnica de Oruro UTO. Oruro, Bolivia. 20 p.
- BOHÓRQUEZ, B.; CAMILO, A. 1995. Biología aplicada. ed. rev. McGraw – Hill. Bogota, Colombia. 419 p.
- CALLIZAYA, I. 1994. Caracterización de las tierras de la Estación Experimental de Choquenaira, según su capacidad de uso y aptitud para riego. Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés; Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia. 126 p.
- CATACORA, T. F., 1996. Producción potencial del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la Violeta. Respuestas varietales a cambios estacionales y a una alimentación hídrica restringida. Tesis de grado, Universidad Mayor de San Simón; Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias Dr. Martín Cárdenas. Cochabamba, Bolivia. 282 p.
- COOK, J. R.; VASETH, J. R. 1991. Wheat Health Management. APS PRESS, Minnesota, USA. 152 p.
- CHILÓN, E. 1997. Manual de fertilidad de suelos y nutrición de las plantas. Facultad de Agronomía UMSA – EMI – CIDAT. La Paz, Bolivia. 104 p.
- DIEHL, R. MATEO BOX, J. M.; URBANO, P. 1985. Fitotecnia general. Mundi prensa. Madrid, España. 775 p.
- DIEPEN, C. van; RAPPOLDT, C; WOLF, J.; KEULEN, H. van. 1988. CWFS Crop growth simulation model WOFOST Documentation, version 4.1. center of world Foot Studies Wageningen, The Netherlands. 299 p.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. 1986. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Riego y Drenaje Estudio FAO N° 33. FAO, Roma, Italia. 275 p.

- EPSTEIN, E. 2000. Absorción de sales minerales. *In*: Fisiología de las plantas. Thomson Learning PARANINFO. Magallanes, España. 234 p.
- FAO 1998. Food and agriculture. Organization of the United Nations. Under Utilized Andean Food Crops. Latin America and the Caribbean. Rome, Italy. p. 70 – 75.
- FAO, 2001. Base de datos. Quinoa. <http://www.FAO.Organización/Inicio.Html>
- FERNÁNDEZ, G. 1986. Fisiología vegetal experimental. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José de Costa Rica. p. 213 – 214
- FRERE, M., 1978. Estudio agroclimático de la zona andina. Organización Meteorológica Mundial. Nota técnica No. 161. Ginebra, Suiza. p. 155 – 162.
- GANDARILLAS, H.; TAPIA, M.; CARDOSO, A. 1979. Historia y distribución geográfica. *In* La quinua y la kañiwa cultivos andinos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. (IICA). Bogota, Colombia. p. 11 – 31.
- GATE, P. 1995. Ecophysiologie du blé: de la plante á la cultura. ITCF- TEC & DOC. Lavoisier, Paris, Francia. 429 p.
- GERMAIN, N. 2004. Producción potencial de biomasa de quinua en el altiplano boliviano. *In* Congreso Cultivos Andinos. Cochabamba, Bolivia CD Rom.
- GOUDRIAAN, J; Laar van, H. 1994. Modelling potential growth processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 238 p.
- HEEMST, H. D. J. 1986. Physiological principles. *In* Modelling of agricultural production: weather, soil and crops. Ed. for van Keulen and Wolf. PUDOC, Wageningen, The Netherlands. p. 13 – 69.
- HOLDRIDGE, L. 1982. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 216 p.

HUIZA, Z. L. 1994. Efecto del déficit hídrico a marchites intensa sobre el ritmo de crecimiento de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). Tesis de grado, Facultad de Agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia 111p.

IBTA, ONS, 1996. Catálogo de variedades mejoradas de quinua y recomendaciones para producción y uso de semilla certificada. Boletín No. 2, año 1996. La Paz, Bolivia. 78 p.

JACOBSEN, E.; MÚJICA, A.; PIERRE, J. 2002. El género *Chenopodium* en la argentina. *In* Cultivos andinos FAO Santiago, Chile. p. 15 – 16.

JONH, P. 1982. Estrategias de adaptación de las plantas. Editorial Limusa. Distrito Federal, México. p. 24 – 25.

JONES, M. B. 1988. El microclima de las plantas. *In* Técnicas de fotosíntesis y bioproductividad. Coombs, J.; may, D.O.; Long, S.P.; Scurlock, J.M.O. Trad. de Ingles por A. Marino. Colegio de postgraduados. Chapingo, Mexico. p. 22 – 33.

KEULEN van, H.; Wolf, J. 1986. Modelling of Agricultural production: weather, soil and crops. PUDOC. Wageningen, Holanda. 479 p.

KOOMAN, P. L. 1995 Yielding ability of potato crops as influenced by temperature, and daylight. Tesis. Graduate School For production Ecology (Pe) y DLO Research Institute for Agrobiology and soil fertility, landbow Universiteit Wageningen. The Netherland. 155 p.

LAWLOR, D. M. 1987. Photosynthesis. Metabolism, control and physiolgy. Longman. New York, USA. 262 p.

LEVRAULT, F.; CROZAT, Y. 2002. Le Fonctionnement d' un peuplement vegetal cultivé. *In* MEMENTO de l'agronome. Ministere de L'Agriculture, de l' Alimentation, de la peche et des affaires rurales. (CIRAD – GRET). p. 435 – 498.

- MACHICADO, J. 1977. Deficiencias mayores de elementos mayores de la quinua (*Chenopodium quínoa* Willd.) Universidad Nacional del Altiplano. Tesis de grado. 158 p.
- MATTOS, G. E. 1993. Rol fisiológico de los nutrientes en la vida de las plantas. *In* Fisiología vegetal. Guía técnica. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia. p. 1 – 4.
- MOULIA, B.; BERNADETTE, J.; DOMINIQUE, R.; VARLET – GRANCHER, C. 1995. Facteurs Climatiques et mise en place des structures *In* De le plante au couvert vegetal Tomo I. Institute National de la Recherche Agronomique INRA Bioclimatologie. Editor Departament de Bioclimatologie. p. 41 – 61.
- MORALES B. de, C. 1988. Manual de Ecología. Instituto de ecología UMSA, Liga de Defensa del Medio Ambiente LIDEMA. p. 43 – 54.
- MÚJICA, A., CANAHUA, A. 1989 Fases fenológicas del cultivo de la quinua (*Chenopodium quínoa* Willd.). *In* Curso taller de cultivos Andinos y uso de información meteorológica. Salcedo. INIAA, EEZA – ILLPA, PICA, PISA. Puno Perú. p. 23 – 27.
- MUJICA, A.; JACOBSEN, S.; AGUILAR, P.; ORTIZ, R.; AMES, T. 1999. La Quinua. Universidad nacional del altiplano. Puno, Perú. 44 p.
- MÚJICA, A-; JACOBSEN, E.; PIERRE, J. 2002. Origen e historia. *In* Cultivos andinos. FAO. Santiago, Chile. p. 6 – 7.
- ORTIZ, R.; ZANABRIA, E. 1997. Plagas en Quinua y Kañiwa. *In* Cultivos andinos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). Bogotá, Colombia. p. 121 – 147.
- ORSAG, V. 1989. Determinación de las variaciones de almacenamiento de agua en suelo Typic palergid del Altiplano central con ayuda de técnicas nucleares. Ecología en Bolivia No 13. La Paz, Bolivia. 17 p.

PENNING de VRIES, F. W.; JENSEN, D. M.; Ten BERGE, H. F.; BAKEMA, A. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth. *In* Several annual crops. Center for Agricultural Publishing Documentation, Wageningen, The Netherlands. 271 p.

RAMOS, S. N., 1999. Producción de quinua, desarrollo y manejo sostenible en Bolivia. *In* Experiencias locales de lucha contra la desertificación en zonas semiáridas. Resúmenes de sistemas de información para comunidades Rurales. ANAPQUI. p. 2.

REA, J; TAPIA, M.; MUJICA, A. 1979. Practicas agronómicas. *In* Quinua y Kañiwa cultivos andinos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). Bogota, Colombia. p. 83 – 105.

RIOS, U. R. 1996. Producción potencial de cultivos C3 – Avena, Triticale y Ray Grass – en La Violeta. Tiquipaya. Tesis de grado. Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias Dr. Martín Cárdenas. Cochabamba, Bolivia. 182 p.

RITCHIE, J. T.; NeSMITH, D. S. 1991. Temperature and crop development. *In* Modelling plant and soil systems – Agronomy monograph No. 31. ASA – CSSA – SSSA, Madison, USA. p. 5 – 29.

ROBERTS, M.; LONG, S.; TIESZEN, L.; BEADLE, C. L. 1988. Medición de la biomasa vegetal y de la producción primaria neta. *In* Técnicas de fotosíntesis y bioproductividad. Coombs *et al.* Trad. de Ingles por garcía Moya. Colegio de postgraduados Estado de México. Chapingo, México. p. 1 – 16.

RODRIGUEZ, M., 1991. Fisiología Vegetal. Editorial Los Amigos del Libro. 1ra. Edición Cochabamba, Bolivia. 445 p.

SALISBURY, F.; CLEON, W. R. 2000. Fisiología de las Plantas. Editorial Thomson Paraninfo S.A. Madrid, España. 988 p.

SUPPO R. F. 1982. Fertilizantes, nutrición vegetal. A.G.T. Editores, 1° ed. D.F., México. 157 p.

TAPIA, M. 1979. Cultivo de la quinua. *In* Manual de agricultura andina. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). La Paz, Bolivia. p. 106 – 111.

TAPIA, M. 1997. Cultivos andinos sub explotados y su aporte en la alimentación. Organización de las Naciones Unidas (ONU). Santiago, Chile. p. 29 – 52.

TOMASSONE R., DERVIN C. Y MASSON J. P. 1993. Biométrie Modélisation de phénomènes biologiques. Masson, Paris. 554 p.

VITKIEVICH, V. J. 1979. Agrometeorología. Ed. Instituto del libro. La Habana, Cuba. 495 p.

WIT de, C. T. de, 1986. Introduction. *In* Modelling of agricultural production: weather, soil and crops van Keulen, H. and Wolf, I. (eds) PUDOC. Wageningen, The Netherlands. p. 3 – 10.