

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
CORPORACION DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
CORPOICA C.I. RIONEGRO

INFORME FINAL INVESTIGACION

*“BALANCE DE NUTRIENTES, PERDIDA DE SUELOS Y DE PESTICIDAS
DURANTE EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE UN CULTIVO DE PAPA”*

CONTRATO CON EL IICA N° 160

Investigadores

Luis Hernán González Santamaría. Profesor Asociado. Investigador Principal
Sonia Jaramillo Villegas, Profesora Asociada. Coinvestigador.
Raúl Darío Zapata Hernández. Profesor Asociado. Coinvestigador.
José Miguel Cotes Torres. Profesor Asistente. Coinvestigador.
Juan Carlos Pérez Naranjo. Profesor Asociado. Coinvestigador.
José Luis Zapata Pareja. Coinvestigador CORPOICA
Gloria Navas Ríos. Coinvestigadora CORPOICA
Álvaro Tamayo Vélez. Coinvestigador CORPOICA
Carlos Antonio Ríos Hincapié. FEDEPAPA

Para

**MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. MADR
ASOCIACION HORTIFRUTÍCOLA DE COLOMBIA ASOHOFrucOL
INSTITUTO INTERMAERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS IICA**

MEDELLÍN
Mayo de 2008

BALANCE DE NUTRIENTES, PERDIDA DE SUELOS Y DE PESTICIDAS DURANTE EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE UN CULTIVO DE PAPA

Resumen ejecutivo

Introducción.....	2
Objetivo principal.....	3
Objetivos secundarios.....	3

1. ACTIVIDADES METODOLOGICAS..... 3

1.1. Selección de lotes análisis físico-químicos de los suelos y adquisición de semilla certificada.....	3
1.2. Construcción de las parcelas de escorrentía en el Centro Paysandú.....	5
1.3. Diseño y construcción del sistema de riego.....	6
1.4 Aplicación de fertilizantes a las parcelas.....	7
1.5. Encalamiento de los suelos de las parcelas antes de la siembra.....	7
1.6. Siembra del cultivo.....	7
1.7 Manejo Cultural del cultivo (Evaluación de germinación, resiembras y manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE)).....	8
1.8. Evaluación de dinámica de nutrientes.....	9
1.9. Determinación de las pérdidas suelos, agua y pesticidas en el cultivo de papa.....	10
1.10. Cosecha.....	10
1.11. Datos climáticos.....	12
1.12. Análisis estadístico.....	12

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 13

2.1. Caracterización del clima.....	13
2.1.1. Temperatura y humedad relativa.....	13
2.1.2. Precipitación.....	14
2.2. Pérdida de Suelo.....	29
2.2.1. Antecedentes.....	29
2.2.1.1. La erosión en los Andisoles.....	29
2.2.1.2. La escala en la evaluación de los procesos erosivos.....	30
2.2.1.3. Los modelos en la pérdida de suelos.....	31
2.2.1.3. Resultados y discusión.....	32
2.3. Escorrentía.....	36
2.4. Pérdida Iónica.....	36
2.4.1. Introducción.....	36
2.4.2. Pérdida de nutrientes: Resultados y discusión.....	41
2.5. Perdida de Pesticidas	49
2.5.1. Cipermetrina.....	49
2.5.2. Clorotalonil.....	49
2.5.3. Pesticidas en el agua de escorrentía.....	50
2.6. Análisis de crecimiento y dinámica de absorción de nutrientes en la papa (<i>solanum tuberosum</i> l.) var. Diacol Capiro.....	57
2.6.1. Estadística descriptiva.....	57
2.6.2. Distribución de la masa seca a través del tiempo, según el tratamiento de fertilización.....	61

2.6.2.1. Masa seca de hojas.....	63
2.6.2.1.1. Análisis de varianza para la variable respuesta hoja.....	64
2.6.2.1.2. Parámetros del modelo estadístico para la variable respuesta hoja.....	64
2.6.2.2. Masa seca de tallos.....	66
2.6.2.2.1. Análisis de varianza para la variable respuesta tallo.....	67
2.6.2.2.2. Parámetros del modelo estadístico para la variable respuesta tallo.....	67
2.6.2.3. Masa seca de raíz.....	67
2.6.2.3.1. Análisis de varianza para variable respuesta raíz.....	69
2.6.2.3.2. Parámetros del modelo estadístico variable respuesta raíz.....	69
2.6.2.4. Masa seca de tubérculos.....	71
2.6.2.4.1. Análisis de varianza para variable respuesta tubérculo.....	73
2.6.2.4.2. Parámetros del modelo estadístico para variable respuesta tubérculo.....	73
2.6.2.5. Masa seca total.....	74
2.6.2.5.1. Análisis de varianza para factor masa seca total.....	75
2.6.2.5.2. Parámetros del modelo estadístico cúbico.....	76
2.6.3. Modelos de producción de masa seca.....	76
2.6.4. Distribución de nutrientes en la biomasa seca del cultivo.....	76
2.6.4.1. Nitrógeno.....	78
2.6.4.1.1. Nitrógeno presente en hojas.....	78
2.6.4.1.1.1. Parámetros del modelo estadístico de la variable respuesta N en masa seca de hojas.....	78
2.6.4.1.2. Nitrógeno presente en tubérculos.....	79
2.6.4.1.3. Nitrógeno presente en masa seca total.....	79
2.6.4.1.3.1. Parámetros del modelo estadístico de la variable respuesta N en masa seca total.....	80
2.6.4.1.4. Distribución de nitrógeno en la planta de papa... ..	81
2.6.4.2. Fósforo.....	86
2.6.4.2.1. Fósforo presente en hojas.....	87
2.6.4.2.1.1. Parámetros del modelo estadístico de la variable respuesta P presente en hojas.....	87
2.6.4.2.2. Fósforo presente en tubérculos.....	88
2.6.4.2.3. Fósforo presente en masa seca total.....	88
2.6.4.2.3.1. Parámetros del modelo estadístico variable respuesta P presente en masa seca total.....	90
2.6.4.2.4. Distribución de fósforo en la planta de papa.....	91
2.6.4.3. Potasio.....	95
2.6.4.3.1. Potasio presente en hojas.....	95
2.6.4.3.1.1. Parámetros del modelo estadístico de la variable respuesta K en masa seca de hojas.....	96
2.6.4.3.2. Potasio presente en tubérculos.....	97
2.6.4.3.2.1. Parámetros del modelo potasio en masa seca de tubérculos.....	98
2.6.4.3.3. Potasio presente en la masa seca total.....	99
2.6.4.3.3.1. Parámetros del modelo potasio en la masa seca total.....	99
2.6.4.3.4. Modelos de distribución de iones en la planta de papa, con tres niveles de fertilización 10-20-20.....	104
2.6.4.4. Conclusiones.....	105

2.7. Modelo de crecimiento del papa basado en grados día.....	105
2.7.1. Introducción.....	105
2.7.2. Metodología.....	106
2.7.2.1. Definición de temperaturas cardinales.....	106
2.7.2.2. Calculo del tiempo termal (unidades calóricas acumuladas) en grados día.....	107
2.7.2.3. Estadística descriptiva.....	110
2.7.3. Discusión de modelos de crecimiento.....	110
2.7.3.1. Método de cálculo de los grados día.....	110
2.7.3.2. Modelos de regresión.....	113
2.7.3.2.1. Modelo de masa seca total (en gramos) en función de los grados día acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.....	113
2.7.3.2.2. Modelo de logaritmo de la masa seca total, en función de los días calendario acumulado, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.....	114
2.7.3.2.3. Modelo de logaritmo de la masa seca total, en función de los grados días (D°) acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.....	115
2.7.4. Conclusiones.....	116
2.7.5. Recomendaciones.....	117
2.8. Respuesta a la fertilización.....	117
2.8.1. Análisis de varianza primer ciclo.....	118
2.8. 2. Análisis de varianza segundo ciclo.....	118
3.0. BIBLIOGRAFIA.....	120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis químico del suelo Centro Paysandú	4
Tabla 2. Densidad aparente de los suelos. Método del terrón parafinado.....	4
Tabla 3. Retención de humedad del suelo.....	4
Tabla 4. Fuente y cantidades de nutrientes utilizados en la incubación de los suelos.....	6
Tabla 5. Tratamientos en las parcelas y cantidad de fertilizante aplicado.....	8
Tabla 6. Cantidades de Mg, B, S, aplicados a las diferentes parcelas de papa sembradas en el Centro Paysandú.....	9
Tabla 7. Productos comerciales e ingredientes activos aplicados al cultivo.....	11
Tabla 8. Esquema de distribución de las plantas de papa al azar para su evaluación.....	12
Tabla 9. Ubicación gráfica de las plantas para rendimiento y para destrucción.....	12
Tabla 10. Intensidades de aguaceros I-15 por mes para el año 2007.....	18
Tabla 11. Intensidades de aguaceros I-30 por mes para el año 2007.....	18
Tabla 12. Intensidades de aguaceros I-45 por mes para el año 2007.....	19
Tabla 13. Intensidades I-60 por mes para el año 2007.....	19
Tabla 14. Análisis estadístico pérdida de suelo en el primer ciclo. Coeficientes del modelo lineal con las variables significativas.....	20
Tabla 15. Coeficientes del modelo lineal con las variables significativas para pérdida de suelo en el segundo ciclo.....	28
Tabla 16. Coeficientes del modelo lineal con las variables significativas para pérdidas de suelo en los dos ciclos de cultivo.....	28
Tabla 17. Pérdida de suelo por parcela en el primer ciclo (kg/ha suelo seco a 105°C).....	33
Tabla 18. Pérdida de suelo por parcela en el segundo ciclo (kg/ha suelo seco a 105°C).....	37
Tabla 19. Estadística Descriptiva para Escorrentía L/ha.....	39
Tabla 20. Coeficientes para el modelo lineal de escorrentía en función de precipitación. Primer ciclo.....	40
Tabla 21. Análisis descriptivo para cada uno de los iones (mg/ha) según el tratamiento de fertilización. Mediciones (25) en los dos ciclos de cultivo.....	42
Tabla 22. Análisis descriptivo para cada uno de los iones (mg ha ⁻¹) según la pendiente del terreno. Mediciones (25) en los dos ciclos de cultivo.....	43
Tabla 23. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Ca en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques.....	44
Tabla 24. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de P en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques.....	45
Tabla 25. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Mg en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques.....	45
Tabla 26. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de K en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques.....	46
Tabla 27. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Na en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques.....	46
Tabla 28. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Fe en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques.....	47
Tabla 29. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de B en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques.....	47

Tabla 30. Análisis del suelo iniciales (promedio de tres muestras) y del suelo erosionado.....	48
Tabla 31. Análisis del suelo perdido por erosión. Primer ciclo.....	48
Tabla 32. Pesticidas determinados en aguas de escorrentía en septiembre de 2007.....	51
Tabla 33. Pesticidas determinados en aguas de escorrentía en Octubre de 2007.....	51
Tabla 34. Pesticidas determinados en las aguas de escorrentía en Noviembre de 2007.....	54
Tabla 35. Pesticidas determinados en las aguas de escorrentía en Diciembre de 2007.....	54
Tabla 36. Coeficientes del modelo lineal de concentración de Clorotalonil (ppm de I.A.) en las aguas de escorrentía, con respecto a las intensidades de precipitación, en un modelo de bloques.....	55
Tabla 37. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Cipermetrina (ppm de I.A.) en las aguas de escorrentía, con respecto a las intensidades de precipitación, en un modelo de bloques.....	56
Tabla.38. Estadísticos descriptivos para las variables de crecimiento (g) en el tratamiento 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	60
Tabla 39. Estadísticos descriptivos para las variables de crecimiento (g) en el tratamiento 1500 kg/ha de fertilizante 10- 20-20.....	62
Tabla 40. Estadísticos descriptivos para las variables de crecimiento (g) en el tratamiento 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	63
Tabla 41. Análisis de varianza para la variable respuesta hoja.....	65
Tabla 42. Parámetros del modelo estadístico cuadrático para la variable respuesta hoja.....	66
Tabla 43. Análisis de varianza para la variable respuesta tallo.....	68
Tabla 44. Parámetros del modelo estadístico cuadrático para la variable respuesta tallo....	69
Tabla 45. Análisis de varianza factores de la variable respuesta raíz.....	70
Tabla 46. Parámetros del modelo cúbico para la variable respuesta raíz.....	71
Tabla 47. Análisis de varianza factores de la variable respuesta tubérculos.....	74
Tabla 48. Parámetros del modelo cúbico de la variable respuesta tubérculos.....	74
Tabla 49. Análisis de varianza factores acumulación de biomasa total.....	76
Tabla 50. Parámetros estadísticos de crecimiento acumulación de biomasa total.....	77
Tabla 51. Modelos Estadísticos para producción de masa seca.....	78
Tabla 52. Parámetros del modelo estadístico de distribución de nitrógeno en hojas.....	80
Tabla 53. Parámetros de variable respuesta N en masa total.....	82
Tabla 54. Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	84
Tabla 55. Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento 1500 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	86
Tabla 56. Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	87
Tabla 57. Parámetros del modelo de distribución de fósforo en factor hojas.....	88
Tabla 58. Parámetros de distribución de variable respuesta fósforo en masa total.....	91
Tabla 59. Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	94
Tabla 60. Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento 1500 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	94
Tabla 61. Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	95

Tabla 62. Parámetros del modelo de de variable respuesta de potasio en hojas.....	97
Tabla 63 Parámetros de distribución de la variable respuesta de potasio en tubérculos.....	99
Tabla 64. Parámetros de distribución de la variable respuesta potasio en masa total.....	101
Tabla 65. Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	102
Tabla 66. Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento 1500 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	102
Tabla 67. Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20.....	103
Tabla 68. Modelos de distribución de iones en la planta de papa, con tres niveles de fertilización 10-20-20.....	104
Tabla 69. Algoritmos para el cálculo del valor de grados día.....	107
Tabla 70. Valores acumulados de tiempos termales (Do) para los tres métodos seleccionados, para las etapas de desarrollo EM-T1, T1-BS, BS-HA en la variedad de papa Asterix, reportados por Strech <i>et al</i> , 2007, en Santa Maria, Río Grande (Brasil) subespecie tuberosum.....	111
Tabla 71. Valores residuales del modelo de masa seca total en función de los grados día acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.....	113
Tabla 72. Valores residuales del modelo logarítmico de la masa seca total, en función de los días calendario acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.....	114
Tabla 73. Valores residuales del modelo logarítmico de la masa seca total, en función de los grados días (D°) acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.....	116
Tabla 74. Rendimiento (kg/parcela) de las 35 plantas seleccionadas para cosecha en el primer ciclo de cultivo.....	118
Tabla 75. Rendimiento (kg/parcela) de las 35 plantas seleccionadas para cosecha en el segundo ciclo de cultivo.....	119
Tabla 76. Análisis de varianza primer ciclo.....	119
Tabla 77. Análisis de varianza segundo ciclo de cultivo.....	119
Tabla 78. Prueba de Tukey.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de retención de humedad del suelo (Andisol). Centro Paysandú.....	5
Figura 2. Oscilación de la temperatura del aire. Primer semestre 2007.....	13
Figura 3. Oscilación de la temperatura del aire en el 2007.....	14
Figura 4. Humedad relativa. Centro Paysandú, 2007.....	14
Figura 5. Precipitación (mm) mensual promedio de 2005-2007.....	15
Figura 6. Intensidades I-15, I-30 I-45 e I-60.de precipitación promedio mensual en mm....	16
Figura 7. Frecuencia de ocurrencia de aguaceros para las I15. Primer ciclo: Marzo 20 y Junio 22 de 2007.....	20
Figura 8. Distribución de Intensidades de precipitación I- 15.en el segundo ciclo.....	21
Figura 9. Relación entre el suelo erosionado (gr/parcela) y la intensidad máxima (mm) de 15 minutos (I-15). Primer ciclo de cultivo.....	21
Figura 10. Relación entre el suelo erosionado (gr/parcela) y la intensidad máxima (mm) de 30 minutos (I-30). Primer ciclo de cultivo.....	22
Figura 11. Relación entre el suelo erosionado (gr/parcela) y la intensidad máxima (mm) de 45 minutos (I-45). Primer ciclo de cultivo.....	22
Figura 12. Relación entre el suelo erosionado (gr/parcela) y la intensidad máxima (mm) de 60 minutos (I-60). Primer ciclo de cultivo.....	23
Figura 13. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha ⁻¹ año ⁻¹) y la intensidad máxima de 15 minutos (I-15mm). Segundo ciclo.....	23
Figura 14. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha ⁻¹ año ⁻¹) y la intensidad máxima de 30 minutos en (mm). Segundo ciclo.....	24
Figura 15. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha ⁻¹ año ⁻¹) y la intensidad máxima de 45 minutos (I-45mm). Segundo ciclo.....	24
Figura 16. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha ⁻¹ año ⁻¹) y la intensidad máxima de 60 minutos (I-60mm). Segundo ciclo.....	25
Figura 17. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha ⁻¹ año ⁻¹) y la intensidad promedio de 15 minutos (I-15 mm). Segundo ciclo.....	25
Figura 18. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha ⁻¹ año ⁻¹) y la intensidad promedio de 30 minutos (I-30 mm). Segundo ciclo.....	26
Figura 19. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha ⁻¹ año ⁻¹) y la intensidad promedio de 45 minutos (I-45 mm). Segundo ciclo.....	26
Figura 20. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha ⁻¹ año ⁻¹) y la intensidad promedio de 60 minutos (I-60 mm). Segundo ciclo.....	27
Figura 21. Precipitación acumulada versus suelo erosionado. Primer ciclo.....	27
Figura 22 Relación entre la pendiente de la parcela (%) y la pérdida de suelo (gr/parcela) en el primer ciclo.....	32
Figura 23. Balance de clorotalonil: Acumulado aplicado vs. Acumulado recuperado en las aguas de escorrentía.....	56
Figura 24. Balance de cipermetrina: Acumulado aplicado vs. Acumulado recuperado en las aguas de escorrentía.....	57
Figura 25. Acumulación de masa seca en hojas de (<i>Solanum tuberosum</i> L.) Var. DIACOL Capiro con tres niveles (500, 1500 y 3000 kg/ha) fertilizante grado 10-20-20.....	65

Figura 26. Acumulación de masa seca en tallos de (<i>Solanum tuberosum</i> L.) Var. Diacol Capiro con tres niveles (500, 1500 y 3000 kg/ha) fertilizante grado 10-20-20.....	68
Figura 27. Acumulación de masa seca en raíces de papa, <i>Solanum tuberosum</i> L. Var. Diacol Capiro, con tres niveles (500,1500 y 3000 kg/ha) fertilizante grado 10-20-20.....	70
Figura 28. Biomasa fresca total (g) en tubérculos, primer ciclo de cultivo.....	72
Figura 29. Acumulación de masa seca en tubérculos, <i>Solanum tuberosum</i> L. Var. Diacol Capiro, con tres niveles (500, 1500 y 3000 kg/ha) fertilizante grado 10-20-20.....	73
Figura 30. Acumulación de biomasa seca total de papa, <i>Solanum tuberosum</i> L. Var. Diacol Capiro, con niveles (500,1500 y 3000 kg/ha) fertilizante grado 10-20-20.....	75
Figura 31. Concentración de N (%) en masa seca de hojas, con tres niveles de aplicación un fertilizante grado 10- 20-20.....	81
Figura 32. Concentración de N (%) en tubérculos, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.....	82
Figura 33. Concentración de N (%) en masa seca total con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.....	83
Figura 34. Concentración de P en masa seca de hojas, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.....	89
Figura 35. Concentración de P en tubérculos, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.....	90
Figura 36. Concentración de P en masa seca total, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.....	92
Figura 37. Concentración de K en de las hojas, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.....	96
Figura 38. Concentración de K en tubérculos con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.....	98
Figura 39. Concentración de K en masa seca total con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10-20-20.....	100
Figura 40. Representación gráfica de tres métodos de cálculo de la suma térmica. Tomado de Streck et al, 2007.....	109
Figura 41. Calculo de grados día (°D), para el periodo de desarrollo del primer ciclo cultivo. Enero 2007 a Junio de 2007. Línea en rojo: °D por método 2. Línea negra: °D Método 3. Municipio de Medellín, vereda Santa Elena, Centro Paysandú.....	109
Figura 42. Etapas de desarrollo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i> . Var.Diacol Capiro) basada en grados día. Adaptación para el primer ciclo de cultivo.....	112
Figura 43. Modelo de logaritmo de la masa seca total de las plantas de papa (gramos), en función de los grados días (D°) acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.....	115
 Fotografía 1. Panorama de las parcelas de escorrentía y del cultivo de papa Variedad Diacol Capiro, previo a floración	7

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
CORPORACION DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
CORPOICA C.I. RIONEGRO

INFORME EJECUTIVO DE INVESTIGACION

*“BALANCE DE NUTRIENTES, PERDIDA DE SUELOS Y DE PESTICIDAS
DURANTE EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE UN CULTIVO DE PAPA”*

CONTRATO CON EL IICA N° 160

Investigadores

Luis Hernán González Santamaría. Profesor Asociado. Investigador Principal
Sonia Jaramillo Villegas, Profesora Asociada. Coinvestigador.
Raúl Darío Zapata Hernández. Profesor Asociado. Coinvestigador.
José Miguel Cotes Torres. Profesor Asistente. Coinvestigador.
Juan Carlos Pérez Naranjo. Profesor Asociado. Coinvestigador.
José Luis Zapata Pareja. Coinvestigador CORPOICA
Gloria Navas Ríos. Coinvestigadora CORPOICA
Álvaro Tamayo Vélez. Coinvestigador CORPOICA
Carlos Antonio Ríos Hincapié. FEDEPAPA

Auxiliares de investigación

Darío A. Castañeda Sánchez. I.A. M. Sc. Estudiante de Doctorado
Diego Alberto Rojas Lopera. I.A. Estudiante de Maestría en Ciencias Agrarias
Edison David Tabares Patiño. Ingeniero Agrónomo
Jairo Yovani Ríos Quinchoa. I.A. Estudiante de Maestría en Ciencias Agrarias
Carlos Andrés Palacios Bejarano. I.A. Estudiante de Maestría en Ciencias Agrarias
Diana Marcela Ramírez Cardona. Estudiante Ingeniería Agronómica
Santiago Alexander Patiño Arango. Estudiante Ingeniería Agronómica
Natalia Andrea Cano Ramírez. Estudiante Ingeniería Agronómica
Jhon William Grajales. Operario en campo
Jorge Humberto Arcila Arango. Conductor y auxiliar de campo

MEDELLÍN
Junio de 2008

Informe ejecutivo proyecto de investigación

“Balance de nutrientes, pérdida de suelos y de pesticidas durante el crecimiento y desarrollo de un cultivo de papa”. Contrato UN-IICA n° 160. MADR y Fondo Nacional Hortofrutícola

Entidad Responsable: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

Director Proyecto: Luis Hernán González Santamaría

Entidades Participantes: Universidad Nacional de Colombia, CORPOICA, FEDEPAPA.

El presente informe consta de dos partes: La relación de las diferentes actividades de extensión y/o transferencia tecnológica y el resumen ejecutivo de los resultados propios del quehacer investigativo.

1. Las actividades de extensión

Las siguientes actividades se realizaron en forma conjunta con las del proyecto “Determinación de niveles adecuados de fertilización en papa Diacol Capiro en diferentes suelos de Antioquia” Proyecto 156 del 2006. Suscrito entre IICA-UNALMED, proyecto igualmente financiado con recursos de las mismas instituciones. De estas actividades se incluye un anexo fotográfico del evento.

- Programa de televisión realizado por Tele Pacifico, transmitido frecuentemente por el canal UNE, canal adscrito a Empresas Públicas de Medellín. En el participan los profesores Sonia Jaramillo Villegas, Luis Hernán González S. y Raúl Zapata Hernández y se detallan las investigaciones.
- “Seminario de divulgación científica y avances de investigación Programa Bases para el manejo integrado de suelos cultivados con papa en Antioquia y programa bases para el manejo integrado de enfermedades de papa en Colombia. Realizado en Febrero 23 24 y 25 de 2008, en el Aula Máxima de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, al cual asistieron cerca de 200 personas, técnicos asociados al cultivo de la papa, estudiantes y agricultores, con participación local y nacional.
- Evento de transferencia de tecnología para agricultores, Teatro Municipal del municipio de La Unión, Antioquia, abril 14 de 10AM a 2PM
- Evento de transferencia de tecnología para agricultores, Centro de Acopio de La Unión, Antioquia, abril 27 de 10Am a 1PM.
- Gira de agricultores y técnicos para visita del experimento, Enero de 2007. Participación de 40 personas.
- Cartilla divulgativa, próxima a edición “Manejo Integrado del Cultivo de la Papa con una Perspectiva Ambiental. 2008 año Internacional de la papa. Programa: Bases para el manejo integrado de suelos cultivados con papa en Antioquia. Luis Hernán González S. Sonia Jaramillo Villegas”

- “Seminario Divulgación Técnica y Avances de Investigación”, el cual se realizará entre el 15 y el 17 de julio de 2008, en el Auditorio Alfonso López Pumarejo de la Universidad Nacional de Colombia, en Santa Fe de Bogotá, con apoyo de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia, FEDEPAPA, y El Consejo Nacional de la Cadena Agroindustrial Papa a través de su Secretaría

2. Informe de investigación “Balance de nutrientes, pérdida de suelos y de pesticidas durante el crecimiento y desarrollo de un cultivo de papa”.

En el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico Paysandú, propiedad de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en municipio de Medellín, Vereda Santa Elena, zona de vida Bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB), se ha iniciado un campo de investigación para evaluar mediante un sistema de captación del escurrimiento (parcelas de esorrentía), las pérdidas de suelo, de los nutrientes y pesticidas. Los datos de la estación climática, permiten determinar la relación de estas pérdidas con la precipitación, tanto cantidad como intensidad, lo cual es básico para la extrapolación de resultados a otras zonas húmedas y muy húmedas.

En particular en esta investigación se cuantificó la esorrentía, las pérdidas de suelo, nutrientes y pesticidas en dos ciclos de cultivo de papa.

Con la investigación se establece además, el ciclo de los nutrientes aplicados al cultivo de la papa: cantidad y tasa de absorción de nutrientes por parte de la planta a través de su ciclo de crecimiento, las pérdidas por percolación o lixiviación y el remanente que queda en el suelo.

Igualmente se determinó el crecimiento de las plantas de papa en el tiempo y se elaboró un modelo matemático de crecimiento de la planta teniendo en cuenta los grados de temperatura acumulados, bajo las condiciones ambientales del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico Paysandú.

Para establecer las pérdidas de agua, suelo, iones y pesticidas, se establecieron nueve parcelas de esorrentía, de 5 m de ancho por 6 m de largo y un sector adicional de captación, para un total de de 36.5 m², aisladas por láminas de “eterboard” y con un sistema de captación de la esorrentía,. Los suelos sobre los cuales se desarrolló la investigación son Andisoles, los cuales se caracterizan por poseer propiedades ándicas: Alta fijación de fosfatos, densidad aparente inferior a 0.90 Mg/m³, altos contenidos de materia orgánica y alta retención de humedad. El lote donde se encuentran las parcelas de esorrentía 1, 2 y 3, presenta una pendiente del 10%, las parcelas 4, 5 y 6, una pendiente del 5% y el lote de la parcelas 7, 8 y 9, una pendiente del 70%.

Mediante ensayos de incubación en el invernadero, se determinaron las cantidades de enmiendas y fertilizantes requeridos para obtener en el suelo los siguientes niveles: 3 y 1,4 cmol+/kg suelo, para el Ca y el Mg, 20 ppm de S y 1 ppm de B.

Para el control de la “gota” causada por *Phytophthora infestans* se utilizaron diferentes fungicidas. Las aplicaciones se realizaron de acuerdo con los niveles de infección, asociados a las condiciones de precipitación. Ocurrieron ataques relativamente leves de “Pulguilla”, *Epitrix cucumeris*, para lo cual se realizaron aspersiones con Athrin (Lambdacihalotrina), Curacrón (Profenofos) y Cipermetrina, tres aplicaciones desde emergencia al aporque. Para determinar las pérdidas de pesticidas durante el desarrollo del cultivo, en el segundo ciclo, se utilizó Cipermetrina y Clorotalonil, dado que CORANTIOQUIA tiene estandarizadas las pruebas para esos pesticidas.

La caracterización climática de la zona de la investigación

Se caracterizó el clima del Corregimiento de Santa Elena, Centro Paysandú, tanto desde el punto de vista de la temperatura, como de la precipitación.

La temperatura de la zona de estudio es óptima para el crecimiento y desarrollo del cultivo de la papa. Las temperaturas promedio oscilan alrededor de la temperatura cardinal óptima para el cultivo de la papa (15 grados centígrados), solo se presentó un evento de baja temperatura por debajo de la temperatura mínima crítica (4 grados centígrados), ningún evento superó la barrera de temperatura máxima crítica (28 grados centígrados). Se presenta una gran homogeneidad en sus valores, mostrando oscilaciones día – noche de aproximadamente unos 10 grados centígrados.

Las relaciones de las lluvias (cantidad de lluvia por evento, cantidad de lluvia acumulada, intensidad de la precipitación) con los fenómenos de pérdida de suelo, de escorrentía superficial, de pérdida iónica y de pesticidas, fueron analizadas mediante la utilización de análisis de correlación lineal múltiple, los cuales tuvieron en cuenta otras variables asociadas como son la cobertura del cultivo (estado de desarrollo y área foliar), la inclinación del terreno (pendiente en %), cuyos resultados serán indicados mas adelante.

En los meses de Octubre y Noviembre se presentó la mayor cantidad de precipitación. Se calcularon diferentes intensidades (I) para 15, 30, 45 y 60 minutos de lluvia denominados I-15, I-30, I-45, I-60, es decir la intensidad máxima de precipitación para un tiempo de 15; 30; 45 o 60 minutos. Estas diferentes intensidades se relacionaron con las pérdidas de agua y suelo por escorrentía.

La pérdida de suelo en el cultivo de la papa

En el primer ciclo de cultivo, enero 2007 a junio 2007, las intensidades máximas I-15 tuvieron un mayor impacto en el proceso erosivo. El análisis estadístico, demuestra que I-15 responde por el 40 % de la pérdida de suelo.

Para el segundo ciclo de cultivo, septiembre 2007 a enero 2008 las máximas intensidades se presentaron en el mes de octubre. En este ciclo las I-30 e I-45 presentaron el mayor efecto sobre el suelo erosionado, el análisis estadístico indica que estas dos variables explican el 42% del suelo erosionado.

La intensidad de la precipitación presenta un papel fundamental en la pérdida de agua vía escorrentía, la cual arrastra los iones, los pesticidas y suelo. Sin embargo, la precipitación acumulada no tuvo un efecto significativo en la remoción de suelo en ninguno de los dos ciclos de cultivo.

Las intensidades de lluvia superiores a 0,3 mm por minuto es decir 4.5 mm/15 minutos, producen escorrentía y pérdida de suelo, este valor concuerda con la tasa de infiltración básica, obtenida por otros autores, en Andisoles no solo de la región, sino en otros países.

Debido a las variaciones en la naturaleza de las lluvias, tanto para el primer semestre como para el segundo semestre, se sugiere que la escogencia de una variable permanente de intensidad, la I-30 utilizada en el modelo USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) propuesto por Wischmeier and Smith, 1978, no es correcta desde el punto de vista del modelamiento para el caso de estudio, e implica un análisis más detallado en el tiempo de la pluviosidad de una zona y de sus efectos en la escorrentía y erosión.

Se evaluó el efecto de la inclinación del terreno en las pérdidas de suelo, el análisis estadístico, indica que la inclinación de la vertiente solo es responsable del 10 % de la erosión, pues la alta intensidad de las lluvias es más erosiva.

La escorrentía o la pérdida de agua en el sistema de cultivo

La práctica cultural de aporque del cultivo, conlleva a “canalizar” los excesos de agua, lo cual favorece la escorrentía. Esta práctica surge de un requerimiento fisiológico del cultivo: Estolón que no esté cubierto de suelo, se transforma en tallo y hojas y no forma tubérculos, además los excesos de humedad en el suelo, no permiten el engrosamiento de los tubérculos, los cuales son susceptibles de pudriciones. Las pérdidas de agua por escorrentía, siguieron el mismo modelo que las de suelo, mencionadas previamente. El valor máximo de escorrentía para un evento, es cercano a 67 m³ de agua/ha y se presentó el 6 de noviembre del 2007.

El modelo estadístico para relacionar la escorrentía y la precipitación, define que las diferentes variables de precipitación explican este proceso en un 81.2 %, un factor de correlación muy alto. La escorrentía no está asociada, en mucho peso, a variables como la cobertura del cultivo (área foliar) ni a la inclinación del terreno.

Pérdida iónica o de nutrientes en las aguas de escorrentía

La erosión del suelo es una forma de transporte de sedimentos suspendidos en el flujo superficial, frecuentemente asociados con nutrientes, N, P, K, etc., tanto en solución como en material particulado; por lo tanto es un mecanismo de transferencia de estos elementos del suelo a los cuerpos de agua.

El fósforo es un elemento esencial en la producción agrícola, sin embargo acelera la eutroficación de los cuerpos de agua, es un nutriente de largo plazo para la biota acuática y está asociado a las explosiones de crecimiento de algas (Cianobacteria y Pfiesteria)

peligrosas para la salud humana. Estas algas contribuyen a la muerte de los peces, deterioran la calidad del agua para consumo humano, forman compuestos carcinogénicos durante la clorinación del agua y tienen nexos con problemas neuronales en seres humanos.

La agricultura es una fuente importante de P para el medio ambiente, en especial los sistemas de cultivos intensivos con el uso de fertilizantes tanto orgánicos como inorgánicos. Para el cultivo de papa, especialmente en suelos andicos, se aplica un exceso de P por encima de los requerimientos o extracciones del cultivo, incrementando la posibilidad de transferir P del suelo a los cuerpos de agua.

En el caso específico de los Andisoles, suelos en los que se realizó esta investigación los contenidos de fósforo disponible son relativamente bajos (8-10 ppm, Bray 2), además tienen una gran capacidad para retener fosfatos. Por definición, al menos el 85% del P aplicado en una solución, es fijado por los minerales secundarios del suelo: alófano, imogolita.

En los dos ciclos de cultivo se realizaron 25 mediciones de iones presentes en las aguas de escorrentía (11 en el primer ciclo y 14 en el segundo ciclo). Se valoró la pérdida por escorrentía (en mg/ha) de: P, Ca, Mg, K, Na, Fe, B.

En general existe una tendencia, no significativa estadísticamente, de pérdida de elementos iónicos (fertilizantes) asociada con las dosis de aplicación, con las épocas de labores culturales (aporque) y con las épocas de máxima precipitación (finales de abril y octubre). Las pérdidas iónicas no son estadísticamente significativas para la variable inclinación de la vertiente, pero sí están asociadas a la precipitación y a la escorrentía.

Estas pérdidas si tenemos en cuenta la cantidad aplicada en los fertilizantes y enmiendas y la cantidad inicialmente presente en el suelo. Situación evidente en los datos presentados a continuación.

El valor máximo de fósforo en las aguas de escorrentía (41.707 mg/ha), se obtuvo en la medición de octubre 25 de 2007, en el tratamiento de 3.000 kg por hectárea de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 5%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) fue de 6.042,44 mg/ha. El total de P recolectado en las mediciones fue de 1'073.940.27 mg/ha/año, es decir 1.07 kg /ha/ año (2.45 kg/ha de P_2O_5 , lo que corresponde a un 0.0000204% del P_2O_5 aplicado). De los elementos mayores es el que menos se pierde por escorrentía, debido especialmente a la naturaleza de la mineralogía de los Andisoles de la investigación, que por definición retienen más del 85% de fosfatos.

El valor máximo de potasio en las aguas de escorrentía (780.139,63 mg/ha), fue obtenido en Abril 24 de 2007, con el tratamiento de 3.000 kg por hectárea de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 10%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) fue de 118.660,5 mg/ha. El total de potasio recolectado en las mediciones equivale a 20'509.288,13 mg/ha/año es decir 20.51 kg/ha/año (24.612 kg de

K₂O/ha/año), lo que corresponde a un 2.051% del K₂O aplicado en los dos ciclos (1.200 kg). Siendo el primero de los elementos mayores en orden de pérdida por escorrentía, situación explicable en parte por su movilidad en el medio y el nivel aplicado en el fertilizante (grado 10-20-20). El análisis estadístico indica que I-15 máxima (I-15m), I-15 promedio (I-15p) e I-30 promedio (I-30p), son variables altamente significativas en las pérdidas de potasio.

El valor máximo de Calcio en las aguas de escorrentía (341.266,92 mg/ha), se obtuvo en la medición de octubre 9 de 2007, con el tratamiento de 3.000 kg por hectárea de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 5%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) fue de 57.555,26 mg/ha. El total de Ca recolectado en las mediciones alcanzó a 10'312.796,22 mg/ha/año, es decir 10,31 kg/ha/año (14.434 kg de CaO/ha). Este fue el segundo de los elementos mayores en orden de pérdida por escorrentía, por debajo del K, situación explicable en parte por su movilidad en el medio y su nivel de aplicación.

El valor máximo de magnesio en las aguas de escorrentía (89.495,67 mg/ha), fue obtenido en octubre 9 de 2007, con el tratamiento de 3.000 kg por hectárea de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 5%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) fue de 18.712,49 mg/ha. El total de magnesio recolectado en las mediciones alcanzó a 2'962.466,18 mg/ha/año, es decir 2,96 kg/ha/año (4,91 Kg/ha de MgO). Es el tercero de los elementos mayores en orden de pérdida por escorrentía, por debajo del Ca y del K.

El valor máximo de hierro en las aguas de escorrentía (144.986,30 mg/ha), se obtuvo en la medición de octubre 16 de 2007, con el tratamiento de 3.000 kg por hectárea de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 5%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) fue 16'739,39 mg/ha. El total de Fe recolectado en las mediciones alcanzó a 3'238.564,17 mg/ha/año, es decir 3,24 kg/ha/año. Las pérdidas de este elemento son muy interesantes, dado que el Fe solo es soluble en estado reducido (Fe⁺²), es decir el ambiente edáfico debe estar en condiciones anaeróbicas o reductoras, lo cual no corresponde con la situación del experimento. Como el ambiente del experimento es oxidativo, estas pérdidas de Fe pueden ser explicadas a través de la formación de quelatos o complejos entre el Fe y las sustancias húmicas y otros materiales de naturaleza orgánica, los cuales estuvieron presentes en las aguas de escorrentía.

El valor máximo de boro en las aguas de escorrentía (7.600 mg/ha) fue obtenido en la medición de octubre 16 de 2007, en el tratamiento de 3.000 kg por hectárea de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 10%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) fue de 565,45 mg/ha. El total de B recolectado en las mediciones alcanzó a 90.465,02 mg/ha/año es decir 0,09 kg/ha/año. Las pérdidas de este elemento son muy bajas, explicable por su baja concentración en estos suelos.

El valor máximo de sodio en las aguas de escorrentía (38.074,72 mg/ha) se obtuvo en octubre 9 de 2007, en el tratamiento de 1500 kg por hectárea de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 10%. El valor promedio obtenido en todas las

mediciones (25) es de 5.909,42 mg/ha. El total de Na recolectado en las mediciones es de 1.09 kg/ha/año. Las pérdidas de este elemento son muy bajas, similar a las del fósforo, hecho explicable por las bajas concentraciones de sodio en estos suelos y además a la no aplicación de este elemento en los diferentes tratamientos.

Pérdida de Pesticidas

Los dos pesticidas evaluados en las aguas de escorrentía fueron Cipermetrina y Clorotalonil, su cuantificación se realizó en el laboratorio de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA, ubicado en la ciudad de Medellín, laboratorio certificado para dicho procedimiento de análisis.

La cipermetrina es un insecticida piretroide, no sistémico que actúa por contacto e ingestión, insoluble en agua, fácilmente degradado y no móvil en suelo.

El clorotalonil es un fungicida aromático policlorado, no sistémico, de acción foliar con alguna actividad protectante, de baja solubilidad en agua. En el suelo se espera que tenga una movilidad baja o nula, una vida media de 10-40 días en suelos aireados y de 5 a 15 días en suelos hidromórficos.

El clorotalonil presente en las aguas de escorrentía, se evaluó estadísticamente contra las variables: Suelo erosionado, volumen de escorrentía, intensidad de la precipitación, ingrediente activo aplicado, días entre aplicación y evaluación del producto en la escorrentía (DAMCI), días entre mediciones o evaluaciones (DM) y sus interacciones, estimando la variabilidad debida a los bloques (pendiente del terreno,) y los efectos de los tratamientos (niveles de fertilización). Las variables que más explicaron la recuperación del clorotalonil en el agua de escorrentía fueron las intensidades de precipitación I-15, I-30, precipitación promedio y precipitación total acumulada, igualmente tiene un efecto estadísticamente significativo el periodo transcurrido entre los días de la aplicación y la medición. En general las pérdidas de pesticidas para el clorotalonil, son mayores que para la cipermetrina.

La cantidad de ingrediente activo aplicado no tuvo un efecto significativo en el modelo estadístico, lo cual sugiere que hay mayor significancia de la acumulación del ingrediente activo en el suelo, que se está reflejando en la cantidad de pesticida recuperado, o que la magnitud del pesticida recuperado está directamente afectado por procesos de desorción del suelo presente en la escorrentía, más que por el lavado directo del pesticida.

El comportamiento de la pérdida de la cipermetrina, sigue los mismos lineamientos del clorotalonil, sin embargo, I-45 tiene un efecto significativo y DM no tiene efecto significativo.

Modelo de crecimiento de la papa

En la investigación se determinó el crecimiento de las plantas de papa en el tiempo, e igualmente se determinó la dinámica de absorción de nutrientes en los diferentes órganos,

(tubérculos, tallos y hojas, raíces y estolones) y su distribución a través del periodo de crecimiento del cultivo de la papa, específicamente de N, P, K, Ca, Mg, S, B. Únicamente en el primer ciclo de cultivo, se realizaron mediciones de área foliar, peso seco de hojas y tallos, raíces-estolones y tubérculos, cada semana a partir de la 5ª semana.

Se llevaron a cabo 8 destrucciones de plantas, dos plantas por parcela, para cada destrucción, para un total de 18 plantas por muestreo. Las 6 primeras destrucciones se realizaron cada semana y las dos últimas se hicieron cada dos semanas. La primera destrucción se realizó en la semana 5, contada a partir de la siembra. Las plantas destruidas, fueron determinadas mediante un muestreo al azar, previamente definido. Se determinó además el índice de área foliar, mediante medición (cm^2) del área que ocupa la planta en la dirección norte- sur; este-oeste.

Se estudió un modelo del crecimiento de la planta de papa, explicado a partir de la producción de materia seca del cultivo, el cual es útil en la medida en que se puede predecir la capacidad productiva del cultivo de papa por medio de factores de crecimiento, como el área foliar.

Cuando se busca establecer modelos que definan un comportamiento determinado, se intenta al máximo que, el modelo explique de la forma más sencilla el comportamiento observado para el factor en estudio. En el caso de no ser posible, como sucede en este caso específico, se deben establecer modelos por separado, que fundamenten el comportamiento particular de cada variable.

El establecimiento del modelo de crecimiento en tubérculos, está determinado por el factor tiempo, expresado de forma lineal, cuadrática y cúbica. Este tipo de modelo similar para tubérculos y raíces, es un poco más complejo.

A partir de los análisis realizados a la biomasa total de las plantas de papa, se concluye que la acumulación de biomasa a nivel foliar depende básicamente del tiempo, es decir, es función de éste, por lo tanto es significativo en s y s^2 . (Tiempo lineal y cuadrático respectivamente).

Los tiempos s y s^2 hacen alusión a regresiones polinómicas, que no definen el comportamiento biológico del cultivo como tal, sino que modelan la acción de cada uno de los factores determinantes en el modelo, (el tiempo, la fertilización y la parcela), evaluados bajo condiciones específicas de campo (pendiente del terreno, humedad, temperatura, etc.). Por tal motivo en este caso específico tanto el tiempo lineal, como el cuadrático, fueron concluyentes para definir la distribución de biomasa seca en las hojas, durante el primer ciclo del cultivo.

Posterior a la octava y hasta la décima semana, se da el punto de máxima acumulación de masa seca en la raíz, en el cual la producción de materia seca es decreciente hasta la semana catorce, Este comportamiento indica que, a partir de la semana diez, cesa la producción de raíces de las plantas de papa; disminución que se refleja en el

decrecimiento de la masa seca, además, implica que gran parte de la biomasa ya formada en raíces se transloca hacia la formación y llenado de tubérculos.

La acumulación de materia seca en tubérculos presenta un incremento continuo a partir de la quinta y sexta semana del cultivo, posterior a las prácticas de aporque; siendo consecuente con la acumulación de biomasa seca en hojas, tallos y raíces.

Entre la sexta y la octava semana se observa un crecimiento acelerado de acumulación de biomasa en los tubérculos en formación, y a partir de la semana de floración (semanas 8 y 9), los incrementos en la producción de materia seca de tubérculos son menores hasta la semana doce.

Se debe hacer énfasis en la importancia de la etapa de floración para el cultivo, puesto que, es en este momento donde la planta deja de invertir energía metabólica en la producción de hojas, tallos y raíces, para iniciar un proceso de translocación de los diferentes nutrimentos y asimilados, para el llenado de los tubérculos.

Debe destacarse el contraste que se produce en la planta, al cambiar de etapa vegetativa a reproductiva; las curvas de crecimiento evaluadas para hojas, tallos y raíces, reflejan el mismo comportamiento desde el inicio de los muestreos en campo (quinta semana después de siembra), hasta llegar a floración (novena y décima semana después de siembra); punto en el cual se da la máxima acumulación de materia seca en la planta. Partiendo de este punto, la planta frena el consumo de energía para el metabolismo para la producción de hojas, tallos y raíces, e invierte ésta en el llenado y nutrición del tubérculo, generándose así el estado de senescencia de las plantas, hasta llegar al final de su etapa reproductiva donde finaliza su desarrollo.

Modelo de absorción de nutrientes por el cultivo de la papa

El estudio de la distribución de nutrientes en la planta, permite diferenciar las etapas críticas de absorción de cada uno de los elementos indispensables para obtener un desarrollo nutricional adecuado del cultivo. En la medida en que se conozca la etapa fisiológica específica, en la que un elemento deba estar presente en la planta, se realizará una fertilización adecuada y oportuna, o sea cuando la planta lo requiera, optimizando los costos de producción y evitando un uso ineficiente de los fertilizantes en el cultivo.

El efecto observado por la aplicación de los diferentes tratamientos de fertilización, indica que a medida que la fertilización es mayor, la planta asimila mayor cantidad de nutrientes, sin embargo, esta mayor absorción no se traduce de forma directa en la producción de tubérculos por parcela, situación que puede interpretarse como un consumo de "lujo", y para la utilización de estos nutrientes en la elaboración de otros compuestos metabólicos, mas no en la producción de tubérculos.

El nitrógeno es requerido en mayor concentración en el estado vegetativo de la planta, principalmente en hojas y tallos, debido a que éste es de suma importancia para la formación de proteínas, y posterior a ello los elementos nutricionales de la planta pasan a

ser parte de los tubérculos, cumpliendo sus funciones en la producción y llenado de tubérculos.

El nitrógeno presente en la masa seca de tubérculos y a lo largo del desarrollo de la planta tiene una tasa de absorción de tendencia constante, siendo mayor la disponibilidad para el tratamiento de 1.500 y 3.000 kg fertilizante 10-20-20/ha. En el tratamiento de 500kg a medida que las plantas crecen hay menor concentración de este elemento en el tubérculo.

El nitrógeno inicial presente en la biomasa seca total de las plantas, es menor a medida que se produce el desarrollo del cultivo a través del tiempo. Esta situación se hizo evidente a partir de la octava semana después de siembra, hasta llegar a la semana 10, en donde se produjo una redistribución del ión nitrógeno, en dirección a los tubérculos para producción y llenado

Las diferencias existentes en la distribución del nitrógeno en los tres tratamientos de fertilización evaluados, se reflejan de forma directa en la producción de biomasa aérea (hojas y tallos) y de forma consecuente en la producción de tubérculos en planta.

Es evidente que el cultivo requiere de manera continua disponibilidad de nitrógeno durante su desarrollo, por lo cual se hace necesario realizar aplicaciones de este elemento en siembra y a porque.

Para el tratamiento de 1.500 kg/ha de fertilizante 10-20-20, la distribución del N es similar al tratamiento de 500 kg/ha, en aquel (1.500kg), se presenta mayor cantidad de nitrógeno para la planta. En la medida en que transcurre el tiempo de desarrollo del cultivo, la cantidad de N asimilado por la planta es exponencial, debido a que las plantas son más vigorosas y absorben cantidades crecientes.

Es importante resaltar que para los tres tratamientos el comportamiento del N fue similar durante todo el desarrollo del cultivo, presentando épocas críticas o de una acción marcada en la distribución de dicho elemento, tales como el inicio de la tuberización en la séptima semana de desarrollo, la floración, como punto de translocación del ion hacia los tubérculos y las etapas finales del cultivo, (semanas 12 y 14), en donde se observa una disminución del nitrógeno en el factor hojas tallos y raíces, asociado con el aumento del contenido de nitrógeno en tubérculos.

La tasa de distribución del fósforo en la materia seca de las hojas es constante desde las primeras semanas del cultivo hasta las semanas 8, a 10 A partir de este momento se observa una disminución pronunciada del contenido de fósforo en la biomasa seca, la cual es continúa hasta las etapas finales de evaluación (semanas 12 y 14); lo anterior implica que el fósforo es un elemento necesario durante todo el desarrollo del cultivo, con un marcado efecto en floración y tuberización.

El contenido de fósforo en la masa seca de los tubérculos presenta un comportamiento errático, lo cual no define su distribución de acuerdo con los parámetros establecidos para campo, y para el diseño estadístico. Para nitrógeno y fósforo en tubérculos, no existe un

modelo lineal definido, posiblemente la expresión del crecimiento pueda ser evidenciada, mediante modelos mucho mas complejos.

Se debe resaltar que los puntos de mayor concentración del P en los tres tratamientos de fertilización, se presentaron durante la etapa de floración, comprendida entre la octava, novena y parte de la décima semana de desarrollo del cultivo.

Los modelos de distribución de nutrientes, que mejor ajustaron fueron fósforo y potasio para hojas y nitrógeno y fósforo para masa seca total.

Esto quiere decir que para las variables que presentaron un ajuste significativo, existe un modelo que las define en todo su estado de crecimiento y además, pueden ser evaluadas en campo bajo las condiciones experimentales planteadas en este estudio.

Para aquellas variables que no presentaron un ajuste significativo, se deben establecer modelos de distribución más complejos que definan el comportamiento del ion durante todas las etapas de desarrollo del cultivo.

La producción de biomasa seca no presentó diferencias significativas en la producción total de kilogramos de tubérculos por parcela, para los distintos tratamientos (500, 1.500, 3.000).

El modelo propuesto para masa seca total al estar ajustado de forma significativa (83%) define la producción a lo largo de las etapas fenológicas del cultivo; este modelo esta también apoyado en el ajuste de los modelos obtenidos para cada órgano.

El contenido de NPK en la planta es mayor en las primeras etapas del cultivo, disminuyéndose considerablemente en la época de floración, por lo cual esta se convierte en un punto crítico para la distribución de asimilados en la planta.

Tasas de absorción de nutrientes

Cuando los resultados de la composición de nutrientes se analizan a la luz de un balance de masas, es decir concentración de nutriente por biomasa, el cultivo de la papa presenta tres tasas diferentes de asimilación de nutrientes en función del tiempo, es decir en términos de la evolución del cultivo. Estas tasas son:

1. Entre la siembra y hasta la semana 6, tasa de asimilación mínima
2. Desde la semana 6 hasta la semana 12, tasa máxima
3. Desde la semana 12 hasta cosecha, tasa de asimilación negativa

Estas tres tasas varían en pendiente (tasa instantánea de asimilación), en función de la dosis de fertilizante o tratamientos, hecho que no se ve reflejado en los rendimientos con diferencias estadísticamente significativas. Estas tres tasas están asociadas al área foliar, es decir, tienen una relación directa con la transpiración del cultivo, lo cual indica que el mecanismo principal de absorción iónica es el flujo masal.

Se corrió una regresión lineal entre contenidos iónicos de la planta y el tiempo (en semanas), desde semana 5 hasta semana 10, la cual dio una correlación del 93%, que sugiere una tasa de asimilación constante para los diferentes iones, exceptuando Ca y Mg, que tienen una curva de tipo exponencial.

La literatura reporta que un 50% del total de la absorción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, por la planta de papa, ocurre durante el periodo comprendido entre la emergencia y el inicio de la floración. En esta investigación se encuentra que solo un 33.3% de esta cantidad se absorbe entre la siembra y la sexta semana y un 76.4 % se absorbe en dos semanas (6 a 8). Este último periodo se vuelve crítico en cuanto a la nutrición mineral del cultivo y por ende se requiere una óptima disponibilidad de los nutrientes en este momento. Pero igualmente crítico es el periodo posterior, en el cual la planta absorbe el otro 50 % de los nutrientes, de manera que la labor cultural realizada frecuentemente por los agricultores, en estos Andisoles, (aplicar la totalidad del fertilizante a la siembra o aplicar 40% a siembra y 60% en aporque), no resuelve adecuadamente estas demandas de nutrientes y que es necesario investigar las aplicaciones de nutrientes post-floración.

Los contenidos de N hasta, dos semanas después del aporque, son similares para los tres tratamientos, es decir el N absorbido en los primeros estados de crecimiento se suple con la dosis mas baja de N, en nuestro caso el 40% de 500kg/ha de 10-20-20, es decir 20 kg de N/ha. Pareciera que aplicaciones mayores facilitan un nivel de ineficiencia debido a la pérdida de N en el Andisol.

En el tratamiento de 500 kg/ha, se presenta en las semanas 7 y 8, pre-floración y floración, una deficiencia en los niveles de N disponible para la planta, lo que afecta la producción de tubérculos. Esta situación no ocurre para los tratamientos con 1.500 y 3.000 kg/ha.

Lo anterior sugiere que el N debe aplicarse en mayor porcentaje al aporque (semana 5) y aplicaciones posteriores a esta práctica cultural, pueden ser promisorias y deben ser evaluadas en el futuro.

Los contenidos de P en el aporque, semana 5 y 6, son similares para los tres tratamientos, es decir el P absorbido en los primeros estados de crecimiento se suple con la dosis mas baja de P, en nuestro caso el 40% de 500kg/ha de 10-20-20, es decir 40 kg de P/ha. Pareciera que aplicaciones mayores favorecen la ineficiencia, debido a la alta tasa de fijación de P por el Andisol, es decir aplicaciones de 40 kg/ha Vs 120 y 240 kg P/ha al momento de la siembra, presentan niveles de P en semana 6 muy similares.

El contenido de P se incrementa en forma notable a partir de la semana 6, debido a una mayor área de las raíces y a una mayor área foliar que transpira, lo cual indica que el P debe estar disponible en el suelo a partir de esta semana y contradice lo que generalmente se ha recomendado: la aplicación de todo el fertilizante fosfatado al momento de la siembra.

Los contenidos de K hasta la semana 7, dos semanas después del aporque, son similares para los tres tratamientos, es decir el K absorbido en los primeros estados de crecimiento se suple con la dosis mas baja de K, en este caso el 40% de 500kg/ha de 10-20-20, es decir 40 kg de K/ha. Pareciera que aplicaciones mayores (120 y 240 kg K/ha) facilitan un nivel de ineficiencia debido a las pérdidas de K (vía lixiviación) en el Andisol utilizado en este experimento.

En el tratamiento de 500 kg/ha, en las semanas 7 y 8 hay déficit de Ca, y el Mg. A partir de la semana 9 la planta absorbe un exceso de Ca, Mg. Pareciera que justo se acaba la disponibilidad del K y del N, la planta absorbe en exceso el Ca y el Mg, que se encuentran disponibles en la solución del suelo, posiblemente por un efecto de ion complementario. Un efecto antagónico entre el Mg y el K ha sido reportado en papa.

En los tratamientos de 1500 y 3000 kg/ha, los contenidos de Ca y el Mg, disminuyen en general a partir de la semana 10, pero la planta presenta contenidos crecientes de N, P, K, incluso hasta la semana 14, lo que indica que la planta puede “desaprovechar toda la absorción de N, P, K”, por la falta de Ca y Mg.

Algunas aplicaciones de los resultados de esta investigación en materia de la fertilización, incluyen:

1. No tiene sentido agronómico ni ambiental, la aplicación total de la dosis de fertilizante N-P-K, al momento de la siembra, ésta debe ser fraccionada.
2. Se sugiere que el Ca y el Mg se apliquen adicionalmente en el aporque.
3. Igual que para el N, el K debe aplicarse en mayor porcentaje en el aporque y aplicaciones posteriores a esta práctica cultural, parecen promisorios y deben ser evaluados en posteriores investigaciones.
4. Estos resultados sugieren que buena parte del P (>40%), debe ser aplicado al aporque.

Modelo de crecimiento de la papa basado en grados día

La temperatura es un factor determinante del crecimiento de las plantas, que requieren de la acumulación de cierta cantidad de calor para pasar de un estado fenológico a otro. Esta acumulación de calor, constituye la energía necesaria para cumplir su ciclo ontogénico y se expresa, mediante distintos procedimientos, como unidades térmicas o grados-día.

El cálculo de grados - día acumulados y el conocimiento de las necesidades de cada fase Fenológica, ayudan a prever la ocurrencia y duración de las mismas, por lo tanto determinan el desarrollo esperado.

El concepto de la suma térmica como unidades de grados día ($^{\circ}\text{D}$), es mejor descriptor del tiempo biológico (crecimiento y desarrollo) que los días calendario, si bien su calculo no presenta un método generalmente aceptado, o bien los trabajos no son claros en su metodología de cálculo.

En el cultivo de la papa y además en esta investigación, se han utilizado tres fases fenológicas: Emergencia (EM), Inicio de Tuberización (TI), Senescencia (BS) y Cosecha (HA).

En el presente trabajo fueron calculadas, funciones de respuesta a temperatura y fotoperíodo, encontrando que la respuesta a termoperíodo fue suficiente para estimar correctamente la primera etapa de desarrollo de la planta, por lo que el fotoperíodo fue omitido en los datos correspondientes a las demás etapas, ya que la papa se considera una planta de día corto para la etapa de inicio de tuberización (TI) y una planta de día largo o neutral para las restantes etapas.

Se considera que la respuesta de la papa, al fotoperíodo, presenta dependencia del genotipo y de la fase de desarrollo. Nuestros resultados preliminares indican que las variedades altoandinas de la subespecie *Andigenum*, no presentan esta dependencia del fotoperíodo, aunque deberán analizarse otras variables compuestas de mayor complejidad como la tasa de radiación PAR interceptada en función del IAF, etc.

Se realizó el cálculo de los grados día por tres métodos. El análisis comparativo en escala absoluta, nos permite ver que hay una alta correspondencia entre la duración total del periodo de crecimiento calculada por el método 1, no adoptado en esta primera parte del experimento y reportada para el trópico en variedades de la subespecie "tuberosum" y la calculada por medio de días calendario para nuestro experimento con variedades altoandinas de la subespecie "andigenum".

En contraste no existen diferencias marcadas para la duración absoluta de la etapa vegetativa (EM-TI) calculada por el método 1 y las tres escalas propuestas (días calendario, método 2 y método 3 en grados día). Los dos métodos empleados no presentan diferencia en la duración de las demás etapas en este experimento y su diferencia de escala es de 40 - 90 grados día, lo que corresponde a unos 4 - 7 días calendario (el valor diario de grados día oscila entre 10 y 12 D°)

Las discrepancias en el ajuste del modelo pueden deberse a la adopción de temperaturas cardinales constantes, en esta primera aproximación al modelo, por lo que se verificará si la adopción de temperaturas cardinales variables puede ajustar mejor los valores de grados día acumulados, con los de días calendario acumulados.

Es importante notar que las escalas relativas de duración total del ciclo, presentan diferencias marcadas con respecto a los datos reportados y los encontrados, lo que podría sugerir que existe una respuesta termodiferencial entre los acervos o subespecies *tuberosum* y *andigenum* lo que ocasiona duraciones mayores del ciclo en estas últimas, por otro lado, esto puede deberse a otros efectos no percibibles en un solo ciclo de desarrollo, por lo que deberá analizarse este aspecto con mas profundidad.

Los grados día acumulados calculados para la variedad Diacol Capiro, presentan valores muy altos para los métodos de calculo 1 y 2, doblando y triplicando los valores

reportados para el trópico con variedades *tuberosum* (escalas proporcionales – valores diferenciales), por lo que es apropiado revisar la posibilidad de ajuste en función de temperaturas cardinales variables, según la etapa de desarrollo de la planta.

El mejor ajuste de escala se logra con días calendario acumulados y grados día reportados por el método 0 (que asume respuesta lineal creciente) puede deberse al rango de temperaturas de la zona ya que no se alcanzan valores extremos.

Una vez verificada la escala absoluta y su consistencia predictiva, se procedió a analizar un modelo de regresión lineal simple, de efecto cuadrático y cúbico con y sin interacciones, para correlacionar los valores de biomasa seca y tiempo cronológico o termal acumulado, obteniéndose los modelos basados en análisis de residuales. luego de la selección, depuración y simplificación.

El primer modelo analizado fue el de regresión lineal simple sin interacciones y como función de la masa seca (en gramos), por su baja correlación (25%) se descartó esta aproximación, elevando la complejidad del modelo de análisis.

El modelo de masa seca total (en gramos) en función de los grados día acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico, resultó altamente significativo para grados día lineales, cuadráticos y cúbicos, además para el intercepto. No se presenta efecto de la parcela ni del tratamiento, pero el coeficiente de regresión ajustado es de 66%, lo que se traduce en que los grados días acumulados, pueden explicar el 66% de los cambios en acumulación de biomasa. Dado esta baja correlación se procedió a transformar la variable masa seca a escala logarítmica como se sugirió con base en la grafica de dispersión de los datos.

El modelo logarítmico de la masa seca total, en función de los días calendario acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico, es altamente significativo para los efectos de días acumulados, días acumulados al cuadrado y el intercepto. El coeficiente de regresión es del 82%, siendo bastante elevado para un experimento de este tipo, que involucra variables biológicas, edafológicas y climáticas, bastante complejas. Por ajuste este modelo seria apropiado para modelar el crecimiento y desarrollo del cultivo en la zona de estudio .La expresión matemática de este modelo es: $\ln(\text{formula} = m_{\text{total}} \sim \text{par} + t_{\text{to}} + \text{dia} + \text{dia}^2, \text{data} = \text{gradosD})$.

Se corrió además un modelo basado en el logaritmo de la masa seca total, en función de los grados días (D°) acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico. Los resultados verifican la alta correlación obtenida en el cálculo de días calendario, pero esta vez en función de grados día o tiempo termal acumulado, con lo que se logra una aproximación similar, pero más realista desde el punto de vista fisiológico.

Este ultimo modelo presenta efectos significativos cúbicos y para el intercepto, con un efecto moderado de las parcelas, el cual se debe adoptar y valorar por su poder predictivo para el otros ciclos del cultivo, ajustando los métodos de calculo de D° y evaluando la mejora o no de la correlación propuesta.

Bajo este modelo se corrió un análisis gráfico cuya curva de respuesta es muy similar a la obtenida para semanas y días acumulados, lo que sugiere se realice un análisis posterior de las tres variables involucradas (semanas, días y grados día).

Respuesta a la fertilización

La respuesta del cultivo de la papa a la fertilización utilizada, 500, 1.500, 3.000 kg/ha de un fertilizante 10-20-20, se evaluó en las 35 plantas seleccionadas, de acuerdo con el diseño estadístico y para los dos ciclos de cultivo. La segunda cosecha fue de menor producción por efecto de la fuerte granizada que afectó el cultivo en el mes de octubre de 2007, con daño en el follaje y los tallos aéreos.

El análisis de varianza para el primer ciclo de cultivo, indica que no hay diferencias significativas entre los promedios de rendimientos para los diferentes tratamientos.

El análisis de varianza para el segundo ciclo de cultivo, indica que hay diferencias entre los tratamientos. Para definir que tratamientos son diferentes, se aplicó la prueba de Tukey, la cual permite concluir que son diferentes los tratamientos 1.500 y 500 a favor de 1500. También son diferentes los tratamientos de 1500 y 3000 a favor de 1500. No hay diferencias entre 500 y 3.000. Lo anterior indica que para este segundo ciclo el mejor tratamiento fue el de 1.500 kg/ha de un fertilizante 10-20-20.

Las plantas ubicadas en las parcelas que recibieron la fertilización de 3.000 kg/ha, presentaron mayor altura, mas volcamiento por efecto del viento y mayor susceptibilidad al ataque de gotera (*Phytophthora infestans*).

Medellín, junio 11 de 2008

"BALANCE DE NUTRIENTES, PERDIDA DE SUELOS Y DE PESTICIDAS DURANTE EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE UN CULTIVO DE PAPA "

Auxiliares de investigación

Darío A. Castañeda Sánchez. I.A. M. Sc. Estudiante de Doctorado

Diego Alberto Rojas Lopera. I.A. Estudiante de Maestría en Ciencias Agrarias

Edison David Tabares Patiño. Ingeniero Agrónomo

Jairo Yovani Ríos Quinchoa. I.A. Estudiante de Maestría en Ciencias Agrarias

Carlos Andrés Palacios Bejarano. I.A. Estudiante de Maestría en Ciencias Agrarias

Diana Marcela Ramírez Cardona. Estudiante Ingeniería Agronómica

Santiago Alexander Patiño Arango. Estudiante Ingeniería Agronómica

Natalia Andrea Cano Ramírez. Estudiante Ingeniería Agronómica

Jhon William Grajales. Operario en campo

Jorge Humberto Arcila Arango. Conductor y auxiliar de campo

INTRODUCCION

Las pérdidas de nutrientes en los sistemas de fertilización no son nada despreciables, aunque no se han cuantificado en el sistema de manejo de la fertilidad en el cultivo de la papa y en los suelos de Colombia, mas específicamente de Antioquia. Estas pérdidas son parte del balance de los nutrientes que participan en el crecimiento y desarrollo del cultivo de papa. Igual situación se presenta con los pesticidas aplicados al cultivo, con el agravante que éstos presentan problemas de contaminación de aguas que afectan la salud humana y el ecosistema.

Se ha iniciado un campo de investigación específica para evaluar pérdidas de nutrientes y pesticidas aplicados en el cultivo de la papa, susceptible de ser utilizado en otros cultivos transitorios hortícolas, pérdidas por percolación interna en el suelo, mediante lisímetros y por escorrentía con un sistema de captación del escurrimiento (parcelas de escorrentía). Estas parcelas permiten determinar las pérdidas y relacionarlas con los niveles de precipitación, lo cual favorece la extrapolación de resultados.

Esta pérdidas son de obligatorio conocimiento si se desea mejorar la eficiencia de los sistemas de fertilización y conocer e intentar mitigar los impactos ambientales, especialmente en los suelos y en los cursos de agua generados por estos agroquímicos, que son utilizados en altas dosis y frecuencias de aplicación por los cultivadores de papa, los cuales en el caso específico del departamento de Antioquia, se concentran en las zonas húmedas y muy húmedas, situación que incrementa las pérdidas.

La investigación establece la tasa de absorción de nutrientes por parte de la planta a través de su ciclo de crecimiento, las pérdidas por percolación o lixiviación y el remanente en el suelo, lo cual permitirá mejorar las técnicas de fertilización en el cultivo. Igualmente se determinó el crecimiento de las plantas de papa en el tiempo y teniendo en cuenta los

Las muestras de suelo de las diferentes parcelas fueron tomadas y sometidas a análisis físicos y químicos requeridos para su caracterización, en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede de Medellín, los resultados de tres repeticiones se presentan en las tablas 1, 2, 3 y figura 1.

Las incubaciones del suelo con diferentes dosis de N, P, K, Ca, Mg, B y S, se realizaron en el invernadero, de La Escuela de Geociencias de La Facultad de Ciencias, Universidad Nacional en Medellín. Estas tuvieron como objetivo determinar las cantidades de fertilizantes y enmiendas que eran necesarios adicionar, para alcanzar los niveles de estos elementos, planteados en la metodología del proyecto: 3 y 1,4 cmol+/kg suelo, para el Ca y el Mg, respectivamente y cantidades de 20 ppm de S y 1 ppm de B.

Tabla 1. Análisis químico del suelo Centro Paysandú.

Muestra	pH	M.O. %	Al ppm	Ca	Mg	K	CICE	P	S	Fe	B
				cmol+/kg suelo				mg/kg suelo			
SP3112	5.4	30.3	1.6	4.5	1.3	0.32	7.7	9	7	238	0.3
SP3113	5.3	31.1	1.4	4.3	1.1	0.26	7.1	10	7	229	0.2
SP3114	5.4	32.2	1.6	4.4	1.3	0.33	7.6	10	8	233	0.2

Tabla 2. Densidad aparente de los suelos. Método del terrón parafinado

Código Laboratorio	Muestra	Densidad Aparente Mg/m ³
3880	Lote 1 (Parcelas 1,2,3)	0.57
3881	Lote 2 (Parcelas 4,5,6)	0.53
3882	Lote 3 (Parcelas 7,8,9)	0.49

Tabla 3. Retención de humedad del suelo

Retención de humedad (%) a diferentes succiones			
Muestra	30 kPa	500 kPa	1500 kPa
Lote 1 (Parcelas 1,2,3)	130.84	86.93	68.91
Lote 2 (Parcelas 4,5,6)	121.41	89.50	75.77
Lote 3 (Parcelas 7,8,9)	129.50	96.76	82.15

Para la incubación se tomaron muestras representativas de los suelos, estas fueron homogenizados y luego pasados por una malla, tamaño de 4 mm, con el fin de desagregar

los terrones más grandes y no dañar la estructura original del suelo. Luego de tener los suelos homogenizados, se procedió a depositar 2 (dos) kg de suelo por repetición en bolsas plásticas. Se evaluaron tres dosis por elemento, tabla 4, tres repeticiones y tres testigos.

1.2. Construcción de las parcelas de escorrentía en el Centro Paysandú

Previo a la construcción de las parcelas, el lote se asperjó con glifosato, con el objeto de controlar el “colchón” de pasto kikuyo (*Penissetum clandestinum*), que impedía una adecuada preparación del suelo, esta última labor se realizó mediante una arada y un pase rápido de rotavator.

Se construyeron nueve parcelas, cada una de 5 x 6 m, el eje mas largo en la dirección de inclinación máxima de la parcela, para obtener tres repeticiones de acuerdo al diseño del experimento. Cada lote de tres parcelas, tiene una inclinación o pendiente diferente. Las parcelas se aislaron una de otra mediante una lámina de “Eterboard” cercana a 5 mm de espesor, esta sobresale del terreno 15 cm y está enterrada en el suelo otros 20 cm. Este material, si bien puede contener calcio, es relativamente muy inerte en el medio ácido de estos suelos, por lo cual se considera que no interfiere con los resultados de la investigación. Las láminas de “Eterboard” se unieron unas a otras mediante tornillos hincados en una estaca de madera, clavada en el terreno.

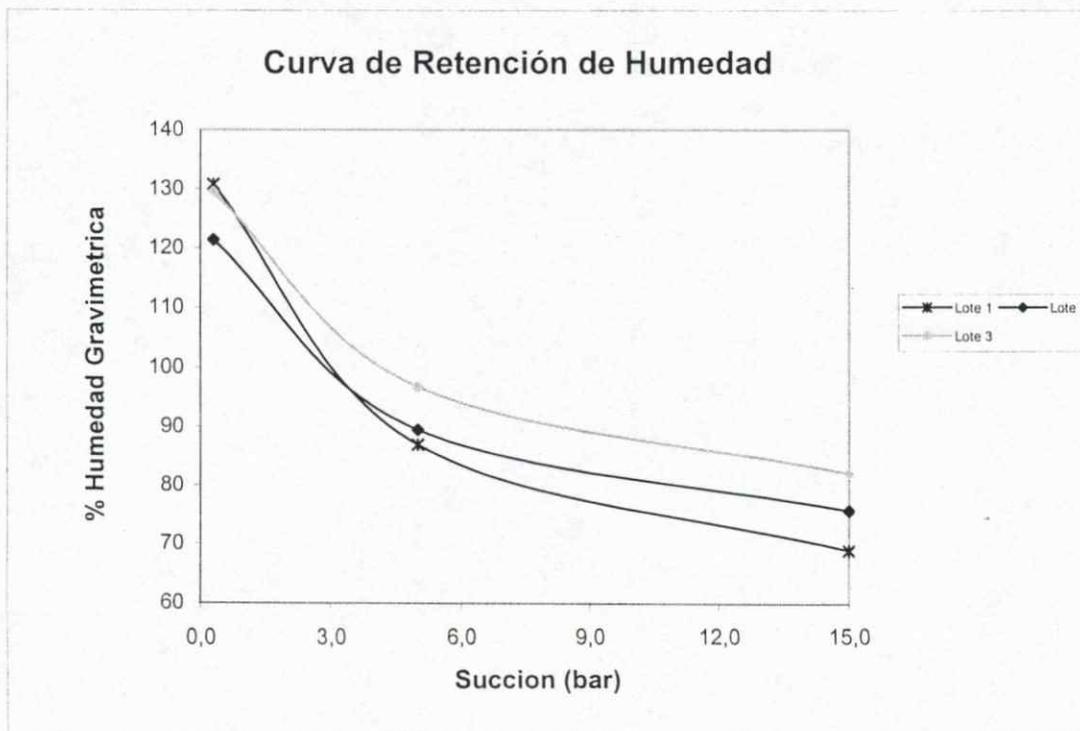


Figura 1. Curvas de retención de humedad del suelo (Andisol). Centro Paysandú

Tabla 4. Fuente y cantidades de nutrientes utilizados en la incubación de los suelos

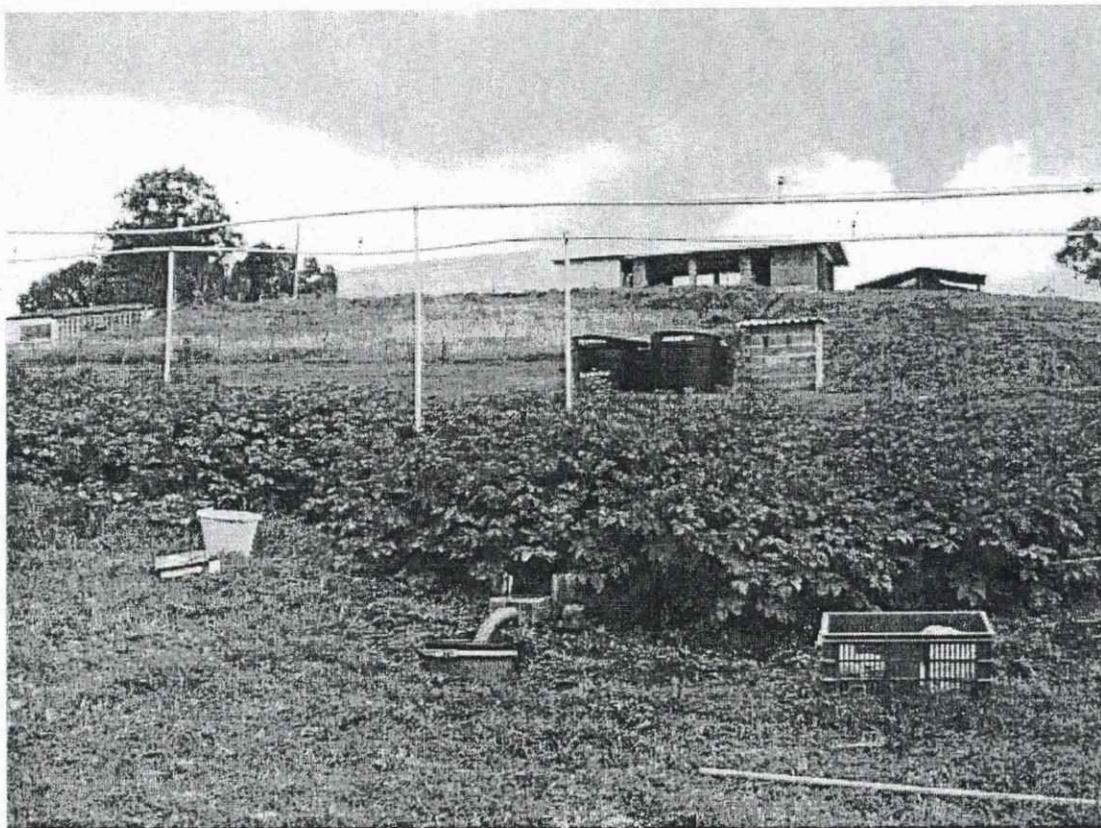
Nutriente	Dosis		
N (kg /ha)	50	150	300
P ₂ O ₅ (kg /ha)	100	300	600
K ₂ O (kg /ha)	100	300	600
Ca (cmol+/kg suelo)	2	3	7
Mg (cmol+/kg suelo)	0.7	1.4	3
S ppm.	10	20	40
B ppm	0.5	1	2

Con el fin de encauzar el agua de escorrentía a los colectores de ésta, cada parcela termina en forma de “embudo”, aumentando su área en 6.5 m²; igualmente con este propósito se organizó un canal o zanja pegado a cada lámina de “Eterboard”, con un ancho aproximado de 12 cm.

Los colectores de escorrentía consisten de una canaleta construida en un acrílico inerte, fotografía 1, la cual se conecta mediante una manguera flexible de 2 pulgadas de diámetro a una caneca plástica. Inicialmente se colocó una caneca con una capacidad cercana a 70 litros y posteriormente se adosó una segunda caneca con capacidad cercana 130 litros. Estas canecas se enterraron parcialmente en el suelo, para facilitar el flujo y captura de la escorrentía. Se considera conveniente para una mejor recolección de la escorrentía modificar las canaletas de acrílico elevando un poco su altura.

1.3. Diseño y construcción del sistema de riego

Las predicciones del clima aseguraban la ocurrencia, en el primer trimestre de 2007, de un verano muy intenso (fenómeno del Niño), el cual efectivamente ocurrió; se procedió a la construcción de un sistema de riego, con el objeto de asegurar la producción óptima del cultivo y su utilización como “simulador de lluvia”. La aplicación del riego permitió tener un desarrollo adecuado del cultivo, evitó la pérdida de éste por la ocurrencia de una helada y se proyectó como simulador de lluvia, pero desafortunadamente el verano tan intenso, limitó la oferta de agua, por lo que solo fue posible abastecer las necesidades del cultivo. El riego se opera automáticamente y para garantizar el almacenamiento de agua requerido, se adquirieron cuatro tanques plásticos cada uno con capacidad de 2.000 L. En cada parcela se colocaron dos aspersores, a una altura de 2.5 metros, para un total en el experimento de 18 aspersores. El riego opera al tiempo en cada bloque (tres parcelas) y se asegura que cada parcela reciba la misma cantidad de agua. El agua de riego se aplicó durante enero, febrero y principios de marzo de 2007.



Fotografía 1. Panorama de las parcelas de escorrentía y del cultivo de papa.

1.4 Aplicación de fertilizantes a las parcelas

Las cantidades de fertilizantes aplicados a las parcelas se realizaron de acuerdo con el resultado del análisis y del ensayo de incubación. Las cantidades que se utilizaron por cada parcela se distribuyeron aleatoriamente.

1.5. Encalamiento de los suelos de las parcelas antes de la siembra

De acuerdo con las cantidades de calcio determinadas, se aplicaron 15.5 kg de carbonato de calcio a cada una de las parcelas. La aplicación se hizo diez días antes de la siembra de la semilla. Este mismo día se aplicó riego a cada una de las parcelas durante 20 minutos. Para el segundo ciclo de cultivo no se encaló.

1.6. Siembra del cultivo

Se utilizó semilla Certificada de papa variedad Diacol Capiro, proveniente del Altiplano Cundido-Boyacense, en los dos ciclos del cultivo. Sólo fue posible hacer análisis de pesticidas para el segundo ciclo. El primer ciclo inició (siembra) en enero de 2007 y terminó (cosecha) en Junio de 2007 y el segundo ciclo se sembró en septiembre de 2007 con cosecha en Febrero 4 de 2008.

En cada parcela (36.5 m²) se sembraron seis surcos (surcos principales) de cinco metros y dos surcos mas (surcos adicionales) ubicados en el “embudo” previamente mencionado. En el primer ciclo se sembraron en cada surco principal 15 tubérculos semilla, en los surcos adicionales se sembraron diez y cinco tubérculos semilla respectivamente. En el segundo ciclo se sembraron solo 14 tubérculos por surco principal y en los surcos adicionales 10 y 4 tubérculos semillas. La semilla se seleccionó por tamaño y grado de brotación, se colocaron en el surco y se taparon con una capa delgada de suelo, de unos diez cm. La siembra en el primer ciclo se realizó el 19 de enero de 2007, y para el segundo ciclo en septiembre 4 de 2007. Los tratamientos con N-P-K se aplicaron a través de un fertilizante comercial grado 10-20-20, para las nueve parcelas tras un sorteo previo, tabla 5.

Tabla 5. Tratamientos en las parcelas y cantidad de fertilizante aplicado

Parcela N°	Dosis (kg/ha) 10-20-20	Cantidad Total kg	Cantidad Aplicada en Siembra (40%)	Cantidad aplicada Aporque (60%)
1	1.500	5.6	2.2	3.4
2	3.000	11.3	4.5	6.8
3	500	1.9	0.8	1.1
4	3.000	11.3	4.5	6.8
5	1.500	5.6	2.2	3.4
6	500	1.9	0.8	1.1
7	500	1.9	0.8	1.1
8	3.000	11.3	4.5	6.8
9	1.500	5.6	2.2	3.4

El fertilizante completo, se distribuyó en dos aplicaciones. 40% al momento de la siembra y el 60% restante se aplicó al momento del “aporque”. Para la siembra se aplicaron la totalidad de B, S, Ca y Mg, que los ensayos de incubación habían definido.

En la tabla 6, se indican las fuentes comerciales de estos nutrientes y las cantidades aplicadas.

En el segundo ciclo de cultivo se presentó una granizada, octubre 24 de 2007, que destruyó drásticamente el área foliar, por lo cual se tomaron medidas de emergencia, aplicando “azúcar” y fertilización foliar, lo cual permitió una recuperación del cultivo, pero obviamente no se alcanzó el nivel deseado.

1.7 Manejo Cultural del cultivo (Evaluación de germinación, resiembras y manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE))

Para el control de la “gota” causada por *Phytophthora infestans* se utilizaron diferentes fungicidas, tabla 7. Las aplicaciones se realizaron de acuerdo con los niveles de infección, asociados a las condiciones de precipitación. Ocurrieron ataques relativamente leves de

“Pulguilla”, *Epitrix cucumeris*, para lo cual se realizaron aspersiones con Athrin (Lambdacihalotrina) y Curacrón (Profenofos) y en el segundo ciclo, se utilizó Cipermetrina, la cual fue utilizada para determinar las pérdidas de pesticidas durante el desarrollo de un cultivo.

Tabla 6. Cantidades de Mg, B, S, aplicados a las diferentes parcelas de papa sembradas en el Centro Paysandú

Elemento	Fuente comercial	Total (g)	Por surco (g)
Mg	Oximag 88%	1.670.5	238.6
B	Borato 48%	10.9	1.6
S	Sulfato de Amonio (21-0-0-24)	437.5	62.5

1.8. Evaluación de dinámica de nutrientes

Se evaluó la dinámica de absorción de nutrientes en los diferentes órganos, (tubérculos, tallos y hojas, raíces y estolones) y su distribución a través del periodo de crecimiento del cultivo de la papa, específicamente de N, P, K, Ca, Mg, S, B. Se realizaron mediciones de área foliar, peso seco de hojas y tallos, raíces-estolones y tubérculos, cada semana a partir de la 5ª semana,

En el cultivo del primer ciclo se llevaron a cabo 8 destrucciones de plantas, las 6 primeras cada semana y las dos últimas se hicieron cada dos semanas, a los 15 días, después de floración. La primera destrucción se llevó a cabo en la semana 5, contada a partir de la siembra. Se tomaron dos plantas por parcela, por cada destrucción, para un total de 18 plantas por muestreo; estas plantas fueron determinadas mediante un muestreo al azar, previamente definido, presentado en las tablas 8 y 9. Se determinó además el índice de área foliar mediante medición (cm^2) del área que ocupa la planta en la dirección norte- sur; este-oeste.

En el segundo ciclo se realizaron tres destrucciones, debido a la fuerte granizada que afectó el cultivo. En estas no se determinaron contenidos iónicos en los diferentes órganos de la planta por los altos costos y la falta de presupuesto.

En el Laboratorio de Fisiología Vegetal de las Plantas, adscrito a la Facultad de Ciencias Agropecuarias, de la Universidad Nacional, sede de Medellín se hicieron las siguientes determinaciones:

- Área foliar, evaluada con un medidor de área foliar: Portable Área Meter, modelo LI-300^a, marca LI-Cor
- Longitud de tallos ó altura de la planta
- Peso fresco y seco (estufa a 60°C) de raíces, tallos, tubérculos, hojas
- Número de tubérculos
- Número de tallos

En el laboratorio de suelos de La Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, se realizaron los análisis químicos de las plantas.

Para el contenido de nutrientes en hojas, tallos, raíces y tubérculos, se deshidrataron y se juntaron las dos plantas de la misma parcela. La submuestra se lleva a una mufla a 550 °C, se procede para la mineralización con HCl 6N. Por espectroscopia de absorción atómica se determinaron Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Mn, Zn y por espectrofotometría molecular P y B.

1.9. Determinación de las pérdidas suelos, agua y pesticidas en el cultivo de la papa

Se recopilaron las escorrentías superficiales en los sistemas de captación previamente establecidos, uno para cada parcela, en total nueve. En el primer ciclo no hubo escorrentía hasta bien entrado el período de floración, la primera recopilación de esta se realizó en marzo 20 de 2007; en este ciclo se recolectó escorrentía 20 veces y en el transcurso, entre el primer ciclo y el segundo ciclo, se recolectó escorrentía siete veces. En el segundo ciclo se recolectó escorrentía treinta veces.

Las determinaciones de pesticidas (18 muestreos en total) se realizaron en las aguas de escorrentía del segundo ciclo. Las muestras se recolectaron según las instrucciones del Laboratorio de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA, para lo cual esta entidad suministro frascos de vidrio color ámbar, previamente preparados. Una vez tomada la muestra en el campo, estos frascos se sellaban con papel de aluminio y se transportaban, lo más pronto posible, al laboratorio en neveras de icopor con hielo. Los pesticidas Clorotalonil y Cipermetrina, se determinaron por medio de cromatografía gaseosa en un cromatógrafo de gases, Hewlett Packard, modelo HP 6890.

Se evaluó la cantidad de agua de escorrentía (L), la cantidad de suelo perdido por efecto de la escorrentía (g). El suelo se reportó como suelo seco a 105°C, para lo cual se realizaron determinaciones de humedad de las muestras.

En algunos eventos de precipitación se encontró que las parcelas no aportaban escorrentía o lo hacían en poca cantidad, razón por la cual se realizaron modificaciones de los sistemas de captación en el segundo ciclo de cosecha.

En el material de suelo captado producto de erosión por escorrentía, se determinaron, mediante análisis químicos, los contenidos de nutrientes. En las aguas de escorrentía se determinó la carga catiónica, el fósforo y los micronutrientes.

1.10. Cosecha

La cosecha en el primer ciclo de cultivo se realizó los días 20 y 21 de junio de 2007. La cosecha del segundo ciclo se realizó el 4 de Febrero de 2008. Se utilizaron 35 plantas por parcela para la evaluación de los rendimientos. Se determinó el número, el peso fresco y los

diferentes tamaños de los tubérculos, se tomó una muestra de tubérculos para su análisis químico.

Tabla 7. Productos comerciales e ingredientes activos aplicados al cultivo

Producto Comercial	Ingrediente activo	Utilizado en
Mancozeb WP	Coordinación del Etilenbisdiotocarbamato de Mn con el ion Zn al 80%	Primer ciclo
Curzate M8	Mancozeb (64%) + Cymoxanil (8%)	Primer ciclo
Ridomil Gold Mz 68 WP	Metalaxil-M, Acido propiónico metil ester (4%) + Mancozeb (64%)	Primer ciclo Segundo ciclo
Rhodax 70WP	Fosetil – Aluminio (35%)-Mancozeb (35%)	Primer ciclo
Forum 500 WP	Dimetomorf (50%) P/P	Primer ciclo Segundo ciclo
□ter□ 250 EC	Difenoconazol (25%)	Primer ciclo
Curacron 500EC	Profenofos (50%)	Primer ciclo Segundo ciclo
Athrin 50EC	Lambdacihalotrina (50gr/l)	Primer ciclo Segundo Ciclo
Cosmo-In d	Alcohol etoxilado (163gr/l), Polioxiethilenealkil □ter (108.5), indicador de alcalinidad 0.3. Surfactante, humectante, adherente	Primer ciclo Segundo ciclo
Agrozul 720 SC	Azufre elemental	Primer ciclo
Consento	Fenamidone (75gr/l), Propanocarb (375gr/l)	Primer ciclo Segundo ciclo
Daconil *	Clorotalonil	Segundo ciclo
Cipermetrina**	Cipermetrina	Segundo ciclo
Cosmoaguas	Citratos regulares de pH (44.5%) y Edetatos quelatantes (55.5%)	Segundo ciclo
A-Micsur	Fertilizante foliar NPK con aminoacidos y micronutrientes	Primer ciclo Segundo ciclo
Potenzol	Alkil aril polieter alcohol	Segundo ciclo

*Daconil: 720SC, Syngenta, reg ICA 2864, Lote SCA7C1402F, F.F. mar/2007, F.V. mar/2009.

**Cipermetrina: 200EC, Agrogen, reg ICA 2711, Lote 032911, F.F. 03/2007, F.V. 03/2009

Tabla 8. Esquema de distribución de las plantas de papa al azar para su evaluación

Parcela Nº	Semanas							
	5	6	7	8	9	10	12	14
1	H	D	B	C	I	A	F	E
2	E	F	G	A	C	H	B	D
3	I	H	G	F	C	E	A	B
4	G	A	F	I	E	B	H	C
5	I	D	B	E	H	A	F	C
6	A	E	G	C	B	D	H	F
7	F	B	A	H	D	I	C	G
8	H	F	A	G	I	B	D	C
9	G	B	C	I	H	E	A	F

Tabla 9. Ubicación gráfica de las plantas para rendimiento y para destrucción

Surco Nº	Planta (15 plantas por surco)													
	1													
2		A		B		C		D		E		F		G
3		A		B		C		D		E		F		G
4			H		I		p	p	p	p	p	p	p	p
5			H		I		p	p	p	p	p	p	p	p
6				p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	
7				p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	
8														

p: Planta para evaluar rendimiento
 A: Planta para destrucción

1.11. Datos climáticos

La estación climatológica hace determinaciones de diferentes parámetros climáticos cada 15 minutos. Desafortunadamente en algunos periodos de tiempo esta información no se pudo obtener, debido a problemas del software. Sin embargo la precipitación acumulada, se obtuvo de los pluviómetros localizados en el sitio del experimento.

1.12. Análisis estadístico

Los datos obtenidos en la investigación (pérdida de suelo, escorrentía, nutrientes y pesticidas) se relacionaron con las variables de precipitación, inclinación de la vertiente, dosis de fertilizante, utilizando modelos lineales y para área foliar se utilizó un modelo no lineal. La evaluación sobre el efecto que tiene la fertilización en la producción de biomasa

se hizo mediante un análisis de varianza. Los análisis se corrieron utilizando el software R y los paquetes Car y Pastecs que funcionan bajo este software.

Para el desarrollo de un modelo matemático de crecimiento del cultivo de la papa basado en grados día, se utilizó un modelo de regresión simple lineal y dos métodos para calcular el tiempo térmico, asumiendo temperaturas cardinales constantes y temperaturas cardinales variables a lo largo del periodo de desarrollo del cultivo. La ecuación de regresión busca explicar el efecto de los grados día sobre la acumulación de biomasa.

Se estimó para el periodo de información los valores promedios mensuales de precipitación, temperatura y humedad, utilizando el programa Excel. Los estadísticos descriptivos de las diferentes intensidades se calcularon utilizando el software estadístico R.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. Caracterización del clima:

2.1.1. Temperatura y humedad relativa

La temperatura de la zona de estudio se caracteriza por una gran homogeneidad en sus valores, presentando oscilaciones día – noche de aproximadamente unos 10 grados centígrados, figuras 2 y 3. Las temperaturas oscilan alrededor de la temperatura cardinal optima para el cultivo de la papa (15 grados centígrados) y solo se presenta un evento de baja temperatura por debajo de la temperatura mínima crítica (4 grados centígrados), ningún evento supero la barrera de temperatura máxima crítica (28 grados centígrados), este hecho se reflejo en la poca variabilidad entre los métodos de calculo del tiempo termal estimado en días calendario y en grados día. La humedad relativa, figura 4, es alta en todo el año.

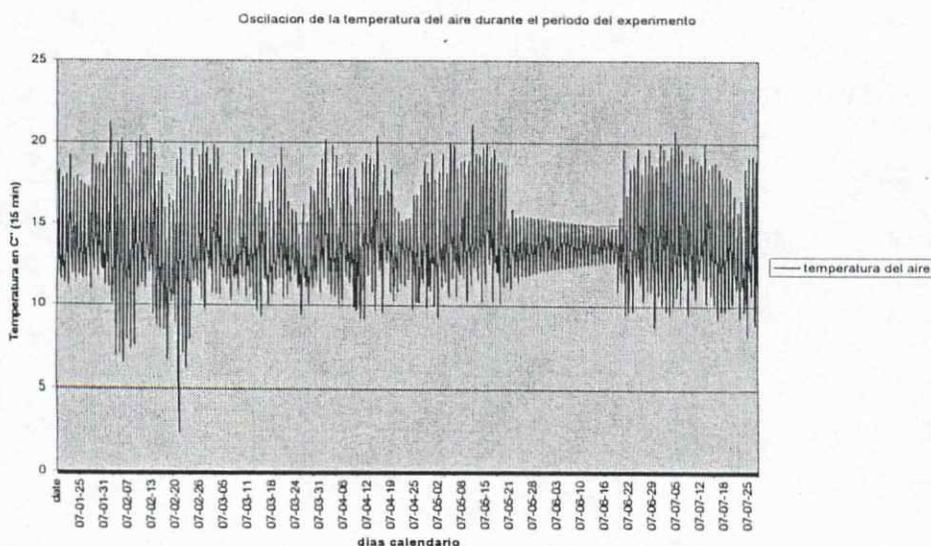


Figura 2. Oscilación de la temperatura del aire. Primer semestre 2007

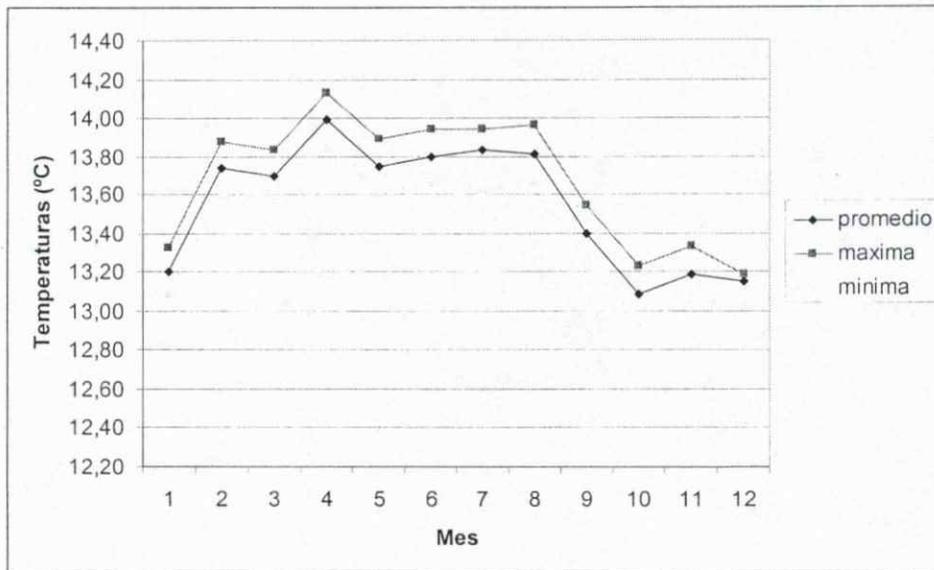


Figura 3. Oscilación del la temperatura del aire en el 2007

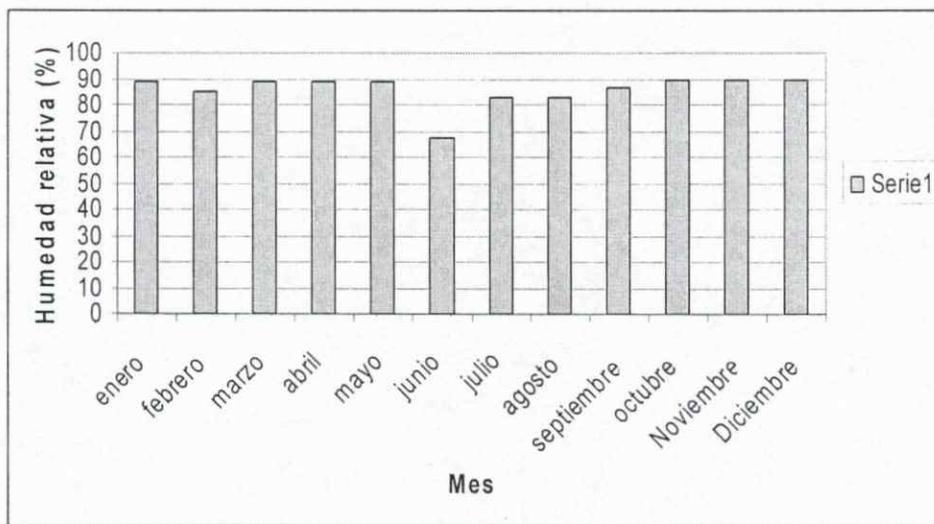


Figura 4. Humedad relativa. Centro Paysandú, 2007

2.1.2. Precipitación

La erosividad de la lluvia es un factor muy importante en el proceso erosivo, Wischmeier and Smith, 1978, la utilizaron como el factor R, en la ecuación USLE, (Ecuación Universal de Perdida de Suelo), estos autores encontraron que el promedio de la suma anual de la energía de la lluvia de I-30, puede ser considerado como el factor R.

La precipitación mensual para el año 2007 se presenta en la figura 5, en la cual se destaca que la mayor cantidad de precipitación se presentó en los meses de Octubre y Noviembre. Se calcularon diferentes intensidades (I) para 15, 30, 45 y 60 minutos: I-15, I-30, I-45, I-60, tablas 10, 11, 12, 13, es decir la intensidad máxima de precipitación para un tiempo de 15; 30; 45 o 60 minutos. La figura 6, indica estas diferentes intensidades para el año 2007, intensidades que se relacionaron con las pérdidas de agua y suelo por escorrentía.

Las intensidades máximas para el primer ciclo I-15; I-30; I-45; I-60 fueron similares: 12.70; 13.97; 14.22 y 14.47 mm respectivamente, lo que implica que la I-15 tuvo un mayor impacto en el proceso erosivo, se concentra la misma cantidad de agua en menor tiempo. El análisis estadístico, tabla 14, demuestra que I-15 responde por el 40,9 % de la pérdida de suelo, en el primer ciclo de cultivo.

Para el segundo ciclo de cultivo, las máximas intensidades se presentaron en el mes de octubre, tablas 10, 11, 12 y 13, cuyos valores fueron I-15: 14.74 mm; I-30: 18.55 mm; I-45: 20.32 mm; I-60: 24.13 mm). En este segundo ciclo las I-30 e I-45 presentaron un efecto significativo en la erosión del suelo, el análisis estadístico indica que estas dos variables explican el 40.5% del suelo erosionado, tabla 15. Para los dos ciclos de cultivo, las variables I-30 promedio e I-45 promedio, explican el 42,3% de las pérdidas de suelo, tabla 16.

En el mes de octubre los aguaceros fueron de mayor intensidad y sumaron la máxima precipitación, además las lluvias presentan su máxima erodabilidad. Igualmente este periodo es crítico para el control de enfermedades fitosanitarias.

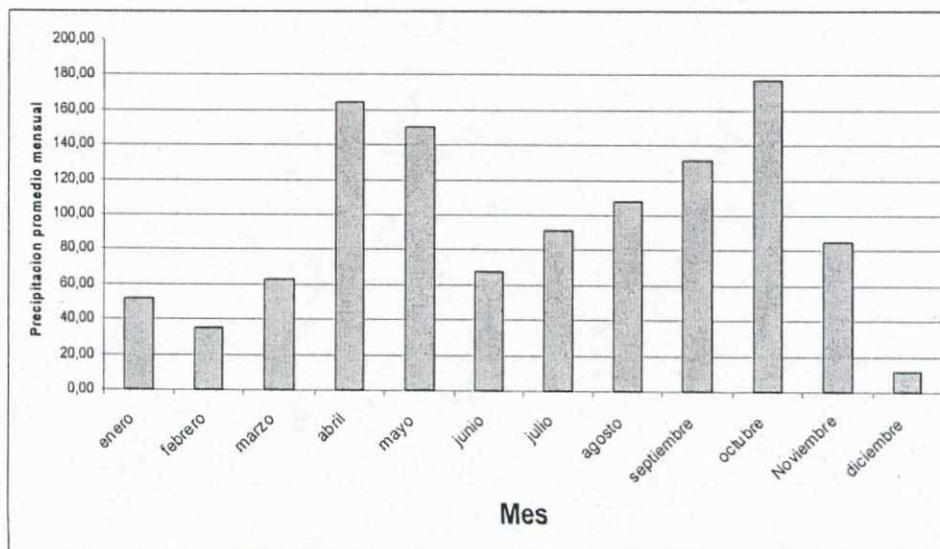


Figura 5. Precipitación (mm) mensual promedio de 2005-2007

Para I-15, en el primer semestre de 2007, los aguaceros de 4-6 mm fueron los mas frecuentes (14), figura 7, seguidos por aguaceros con intensidades de 12-14 mm, con 6 eventos y solo las lloviznas ligeras (0-2 mm) se presentaron en cuatro oportunidades, lo que tipifica una distribución normal de la ocurrencia para este periodo de lluvias. Por cada 2.3 aguaceros que se presentaron con el I-15 promedio, se presentó un aguacero con I-15 máximo, lo que indica que los eventos de I-15 máximo son relativamente frecuentes.

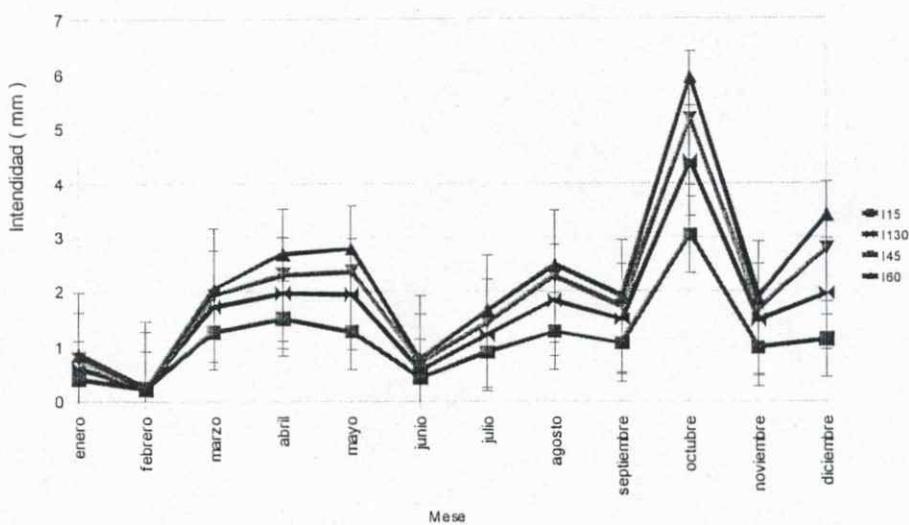


Figura 6. Intensidades I-15, I-30 I-45 e I-60.de precipitación promedio mensual en mm.

En el segundo ciclo de cultivo, el mayor número de eventos de I-15 se encuentran por debajo de 2 mm, figura 8, por lo tanto estas intensidades tuvieron poco efecto sobre la pérdida de suelo.

Las figuras 9, 10, 11 y 12, indican para el primer ciclo, la relación entre las diferentes intensidades máximas y la pérdida de suelo. Los aguaceros entre 6 y 8 mm comienzan a tener un impacto significativo en la pérdida de suelo, para I-15, I-30, I-45. En el caso de I-60 la pérdida de suelo se inicia con aguaceros superiores a 11 mm.

Las figuras 13, 14, 15 y 16, indican para el segundo ciclo, la relación entre las diferentes intensidades máximas y la pérdida de suelo. Como puede apreciarse la variable I-max, no explica en forma adecuada la pérdida de suelo; se presentan varios puntos de máxima pérdida, sin embargo algunos de ellos coinciden con valores de 0,3mm/min, valor que corresponde con la tasa de infiltración básica de los Andisoles del estudio.

Las figuras 17, 18, 19 y 20, indican para el segundo ciclo, la relación entre las diferentes intensidades máximas promedio y la pérdida de suelo. La variable I-prom, explica de forma mas adecuada la relación con la pérdida de suelo.

Para el primer ciclo de cultivo, la precipitación acumulada no tuvo un efecto significativo en la remoción de suelo, la figura 21, evidencia una pérdida de suelo relativamente constante para las diferentes cantidades de lluvia acumulada en el ciclo de cultivo.

En la sub-estación Justiniano Londoño (Naranjal), ubicada en Chinchiná, Departamento de Caldas, Suárez de Castro y Rodríguez Grandas, (1962) en trabajos de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, reportaron intensidades un poco mayores; por ejemplo para I-15 los valores máximos presentados entre 1951 a 1956, para dos vertientes fueron de 30.5 mm y de 35.2 mm, valores reportados en Noviembre 15 de 1954, año en el que la lluvia total fue de 2.912 mm. Debe tenerse en cuenta que entre mas precipitación presenta una región, mayor es la frecuencia de aguaceros más intensos.

En esta investigación las relaciones de las lluvias (cantidad de lluvia por evento, cantidad de lluvia acumulada, intensidad de la precipitación) con los fenómenos de pérdida de suelo, fueron analizadas mediante la utilización de análisis de correlación lineal múltiple, los cuales tuvieron en cuenta otras variables asociadas como son la cobertura del cultivo (estado de desarrollo y área foliar), la inclinación del terreno (pendiente en %), el modelo lineal completo obtenido corresponde a la siguiente ecuación:

$$lm(ss \sim Par + PpMaxp + PpAcp + Pp15p + Pp30p + Pp45p + Pp60p, data = psuelo)$$

Donde:

Par: parcela

PpMaxp: precipitación máxima entre dos evaluaciones

PpAcp: precipitación acumulada entre dos evaluaciones

Pp15p: Intervalo de 15 minutos con mayor precipitación entre dos mediciones **Pp30p:**

Intervalo de 30 minutos con mayor precipitación entre dos mediciones

p60p: Intervalo de 60 minutos con mayor precipitación entre dos mediciones

Tabla No 10. Intensidades de aguaceros I-15 por mes para el año 2007

Estadísticos Descriptivos Mensuales I-15. Año 2007								
Mes	min	máx	range	median	mean	var	std.dev	coef.var
Enero	0.00	2.29	2.29	0.25	0.42	0.40	0.63	1.52
Febrero	0.00	3.05	3.05	0.00	0.23	0.34	0.58	2.49
Marzo	0.00	12.70	12.70	0.25	1.28	5.99	2.45	1.92
Abril	0.00	9.65	9.65	0.89	1.52	4.60	2.14	1.41
Mayo	0.00	4.57	4.57	1.27	1.28	1.55	1.24	0.97
Junio	0.00	3.56	3.56	0.00	0.44	1.11	1.06	2.40
Julio	0.00	9.14	9.14	0.25	0.91	3.42	1.85	2.03
Agosto	0.00	9.14	9.14	0.51	1.29	3.56	1.89	1.46
Septiembre	0.00	4.32	4.32	0.64	1.07	1.63	1.28	1.19
Octubre	0.25	14.99	14.74	2.29	3.05	12.74	3.57	1.17
Noviembre	0.00	5.08	5.08	0.38	0.99	1.70	1.30	1.30
Diciembre	0.25	2.79	2.54	0.76	1.14	1.44	1.20	1.05

Tabla No 11. Intensidades de aguaceros I-30 por mes para el año 2007

Estadísticos Descriptivos Mensuales I-30. Año 2007								
Mes	min	max	range	median	mean	var	std.dev	coef.var
Enero	0.00	3.56	3.56	0.25	0.61	0.90	0.95	1.55
Febrero	0.00	3.05	3.05	0.00	0.25	0.36	0.60	2.37
Marzo	0.00	13.97	13.97	0.38	1.73	8.77	2.96	1.71
Abril	0.00	10.67	10.67	1.53	1.98	6.21	2.49	1.26
Mayo	0.00	6.35	6.35	1.78	1.96	3.00	1.73	0.88
Junio	0.00	5.08	5.08	0.00	0.58	2.27	1.51	2.61
Julio	0.00	9.90	9.90	0.25	1.22	4.45	2.11	1.72
Agosto	0.00	13.46	13.46	0.76	1.86	7.09	2.66	1.43
Septiembre	0.00	5.59	5.59	1.02	1.50	3.08	1.76	1.17
Octubre	0.25	18.80	18.55	3.17	4.39	21.44	4.63	1.05
Noviembre	0.00	8.13	8.13	0.51	1.49	4.45	2.11	1.42
Diciembre	0.25	5.08	4.83	1.27	1.97	5.23	2.29	1.16

Tabla 12. Intensidades de aguaceros I-45 por mes para el año 2007

Estadísticos Descriptivos Mensuales I-45. Año 2007								
Mes	min	max	range	median	mean	var	std.dev	coef.var
Enero	0.00	4.07	4.07	0.25	0.77	1.51	1.23	1.58
Febrero	0.00	3.05	3.05	0.00	0.26	0.36	0.60	2.29
Marzo	0.00	14.22	14.22	0.38	1.95	10.28	3.21	1.65
Abril	0.00	11.18	11.18	1.65	2.31	7.42	2.72	1.18
Mayo	0.00	7.62	7.62	2.03	2.37	4.44	2.11	0.89
Junio	0.00	6.35	6.35	0.00	0.72	3.56	1.89	2.64
Julio	0.00	9.90	9.90	0.25	1.46	5.41	2.33	1.59
Agosto	0.00	16.25	16.25	1.01	2.29	10.25	3.20	1.40
Septiembre	0.00	6.35	6.35	1.26	1.74	4.05	2.01	1.16
Octubre	0.25	20.32	20.07	3.55	5.18	26.98	5.19	1.00
Noviembre	0.00	9.91	9.91	0.51	1.71	6.04	2.46	1.44
Diciembre	0.25	7.62	7.37	1.65	2.79	12.10	3.48	1.25

Tabla 13. Intensidades I-60 por mes para el año 2007

Estadísticos Descriptivos Mensuales I-60. Año 2007								
Mes	min	max	range	median	mean	var	std.dev	coef.var
Enero	0.00	4.57	4.57	0.25	0.86	1.88	1.37	1.60
Febrero	0.00	3.05	3.05	0.00	0.26	0.36	0.60	2.29
Marzo	0.00	14.47	14.47	0.50	2.06	10.80	3.29	1.60
Abril	0.00	11.18	11.18	1.90	2.70	10.00	3.16	1.17
Mayo	0.00	8.39	8.39	2.29	2.79	5.63	2.37	0.85
Junio	0.00	7.11	7.11	0.00	0.78	4.47	2.11	2.69
Julio	0.00	9.90	9.90	0.50	1.68	6.89	2.63	1.56
Agosto	0.00	16.50	16.50	1.27	2.50	11.09	3.33	1.33
Septiembre	0.00	6.35	6.35	1.38	1.94	4.86	2.20	1.14
Octubre	0.25	24.13	23.88	4.44	5.94	36.40	6.03	1.02
Noviembre	0.00	9.92	9.92	0.51	1.90	7.72	2.78	1.46
Diciembre	0.25	6.60	6.35	3.41	3.42	13.36	3.65	1.07

Tabla 14. Análisis estadístico pérdida de suelo en el primer ciclo. Coeficientes del modelo lineal con las variables significativas

Coeficientes	Estimate	Std.Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-374.81	819.55	-457	0.6524	
Par F2	-1686.65	1401.69	-1203	0.2429	
Par F3	61.33	764.7	80	0.9369	
Par F4	594.7	1031.01	577	0.5705	
Par F7	1352.31	735.3	1839	0.0808	.
Par F8	235.54	825.88	285	0.7784	
Par F9	936.28	735.3	1273	0.2175	
Pp15p	1190.41	479.26	2484	0.022	*
Pp30p	-892.58	460.49	-1938	0.0668	.

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1277 on 21 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.5569, Adjusted R-squared: 0.4092

F-statistic: 3.771 on 7 and 21 DF, p-value: 0.008418

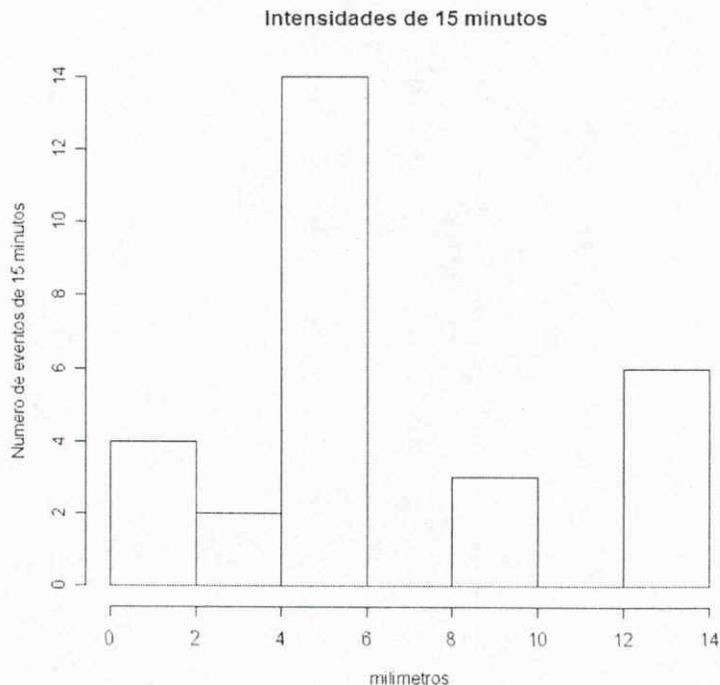


Figura 7. Frecuencia de ocurrencia de aguaceros para las I15. Primer ciclo: Marzo 20 y Junio 22 de 2007.

Frecuencias para I-15

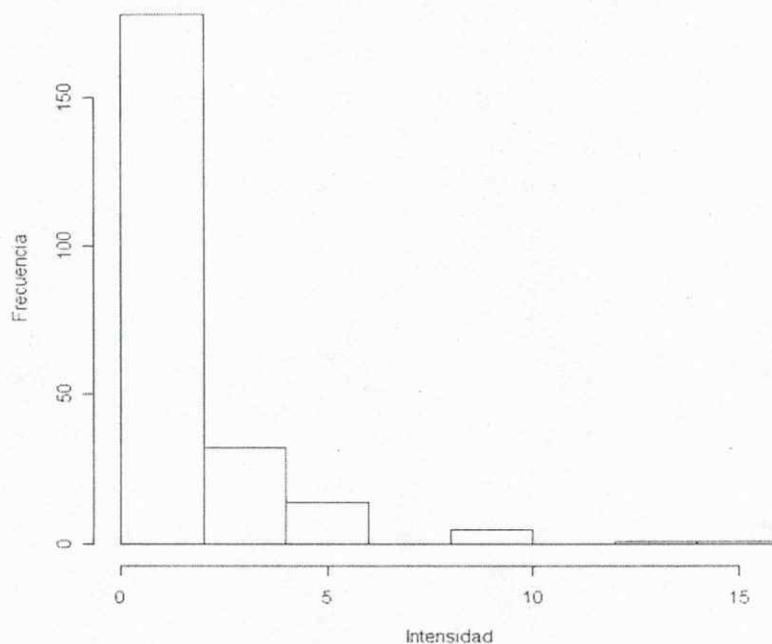


Figura 8. Distribución de frecuencias en el segundo ciclo. Intensidades de precipitación I- 15.

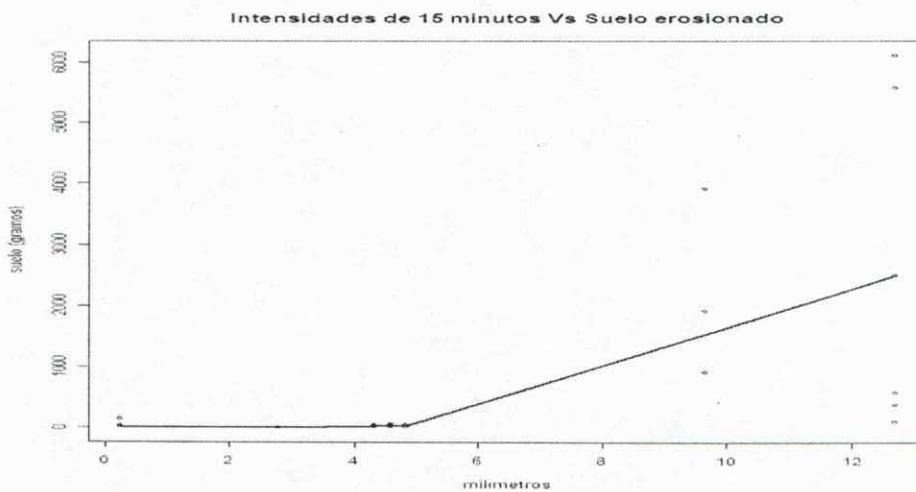


Figura 9. Relación entre el suelo erosionado (gr/parcela) y la intensidad máxima (mm) de 15 minutos (I-15). Primer ciclo de cultivo.

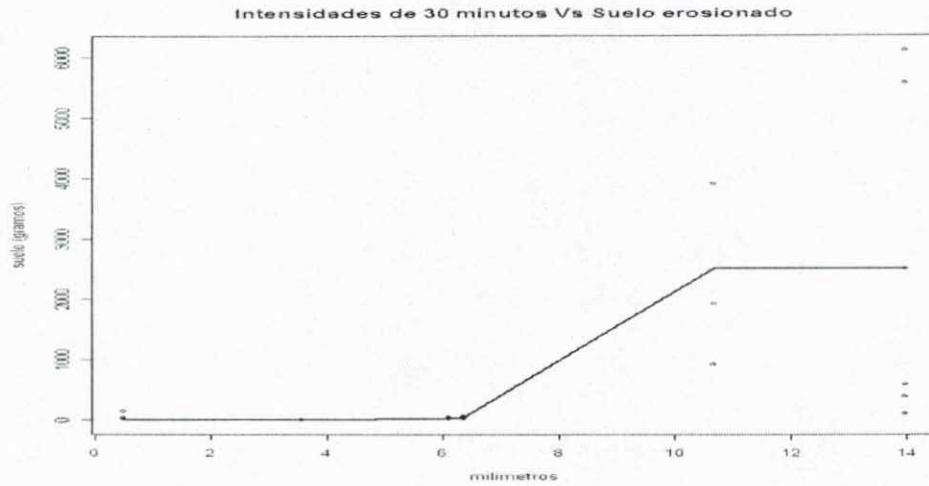


Figura 10. Relación entre el suelo erosionado (gr/parcela) y la intensidad máxima (mm) de 30 minutos (I-30). Primer ciclo de cultivo

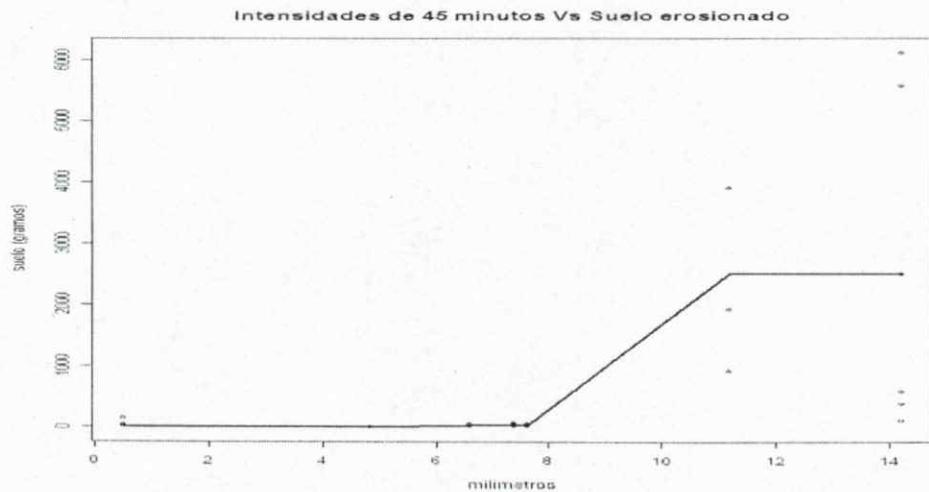


Figura 11. Relación entre el suelo erosionado (gr/parcela) y la intensidad máxima (mm) de 45 minutos (I-45). Primer ciclo de cultivo.

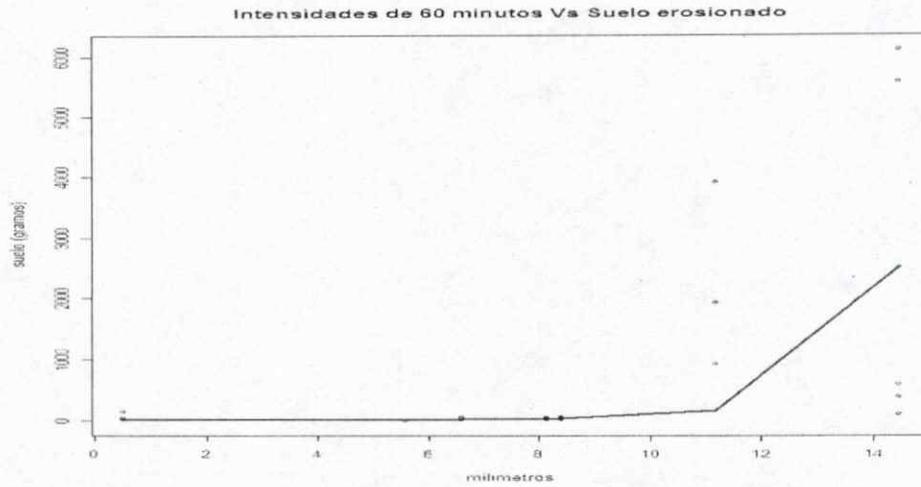


Figura 12. Relación entre el suelo erosionado (gr/parcela) y la intensidad máxima (mm) de 60 minutos (I-60). Primer ciclo de cultivo.

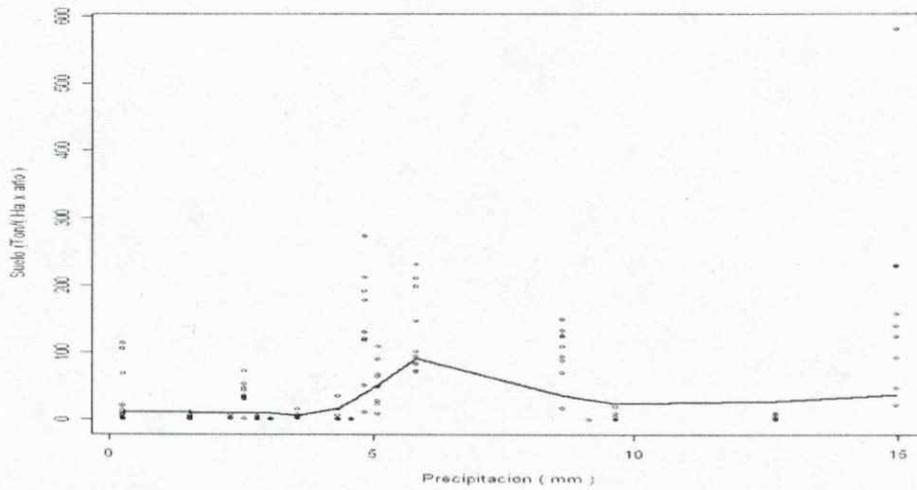


Figura 13. Relación entre el suelo erosionado (Ton ha⁻¹ año⁻¹) y la intensidad máxima de 15 minutos (I-15mm). Segundo ciclo.

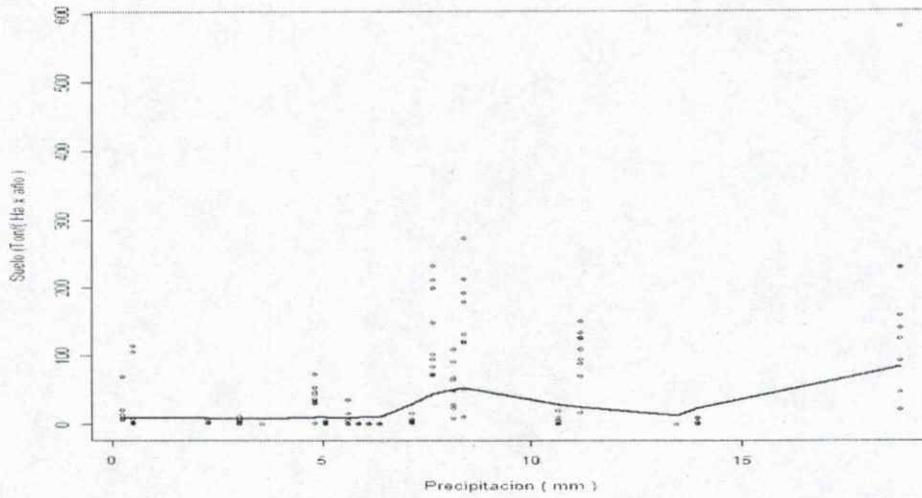


Figura 14. Relación entre el suelo erosionado ($\text{Ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y la intensidad máxima de 30 minutos en (mm). Segundo ciclo.

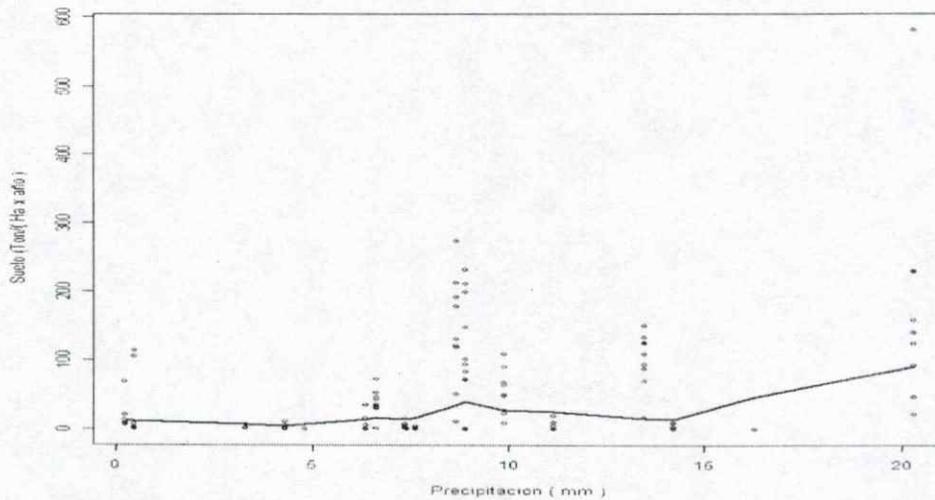


Figura 15. Relación entre el suelo erosionado ($\text{Ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y la intensidad máxima de 45 minutos (I-45mm). Segundo ciclo.

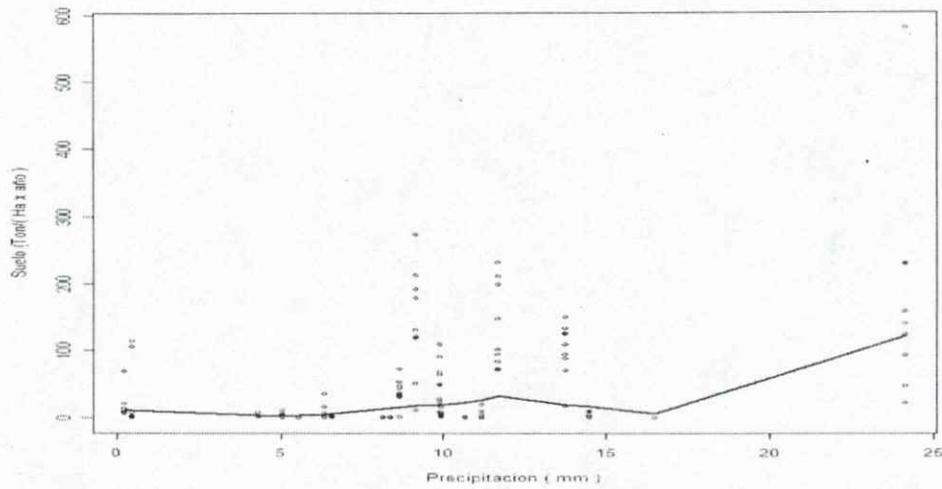


Figura 16. Relación entre el suelo erosionado ($\text{Ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y la intensidad máxima de 60 minutos (I-60mm). Segundo ciclo.

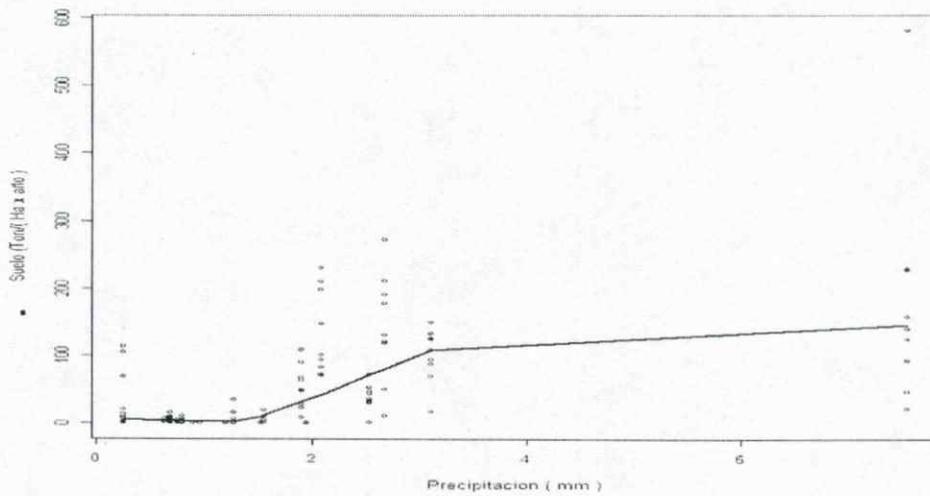


Figura 17. Relación entre el suelo erosionado ($\text{Ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y la intensidad promedio de 15 minutos (I-15 mm). Segundo ciclo

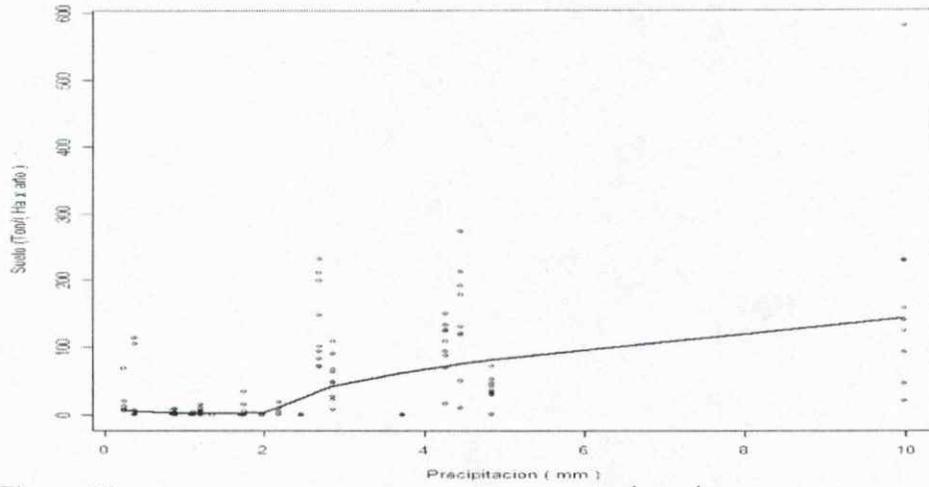


Figura 18. Relación entre el suelo erosionado ($\text{Ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y la intensidad promedio de 30 minutos (I-30 mm). Segundo ciclo

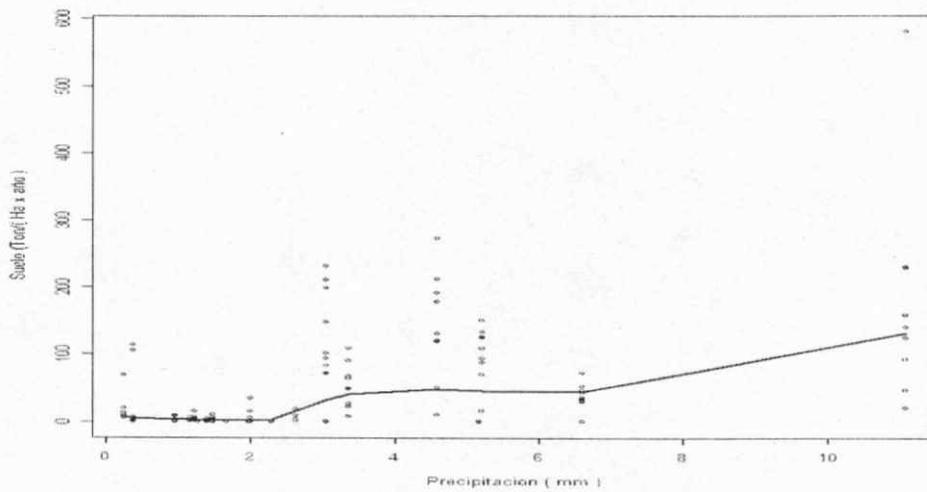


Figura 19. Relación entre el suelo erosionado ($\text{Ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y la intensidad promedio de 45 minutos (I-45 mm. Segundo ciclo)

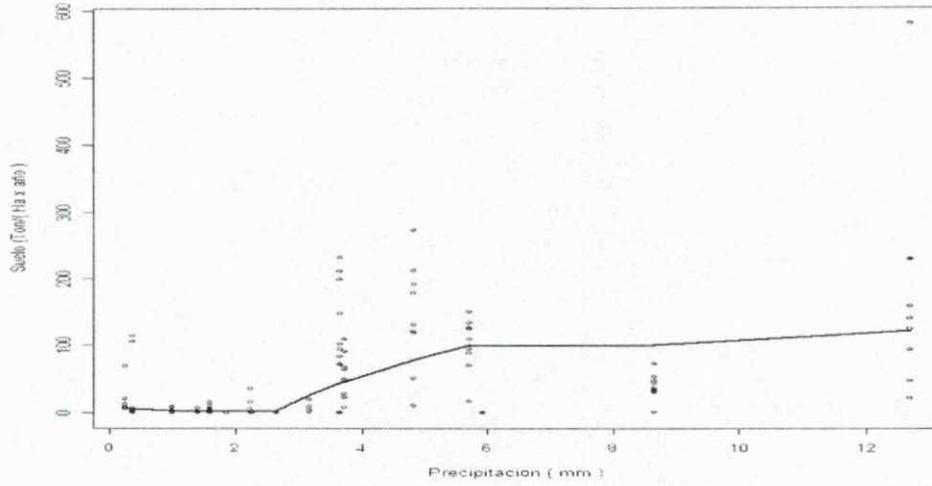


Figura 20. Relación entre el suelo erosionado ($\text{Ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y la intensidad promedio de 60 minutos (I-60 mm). Segundo ciclo.

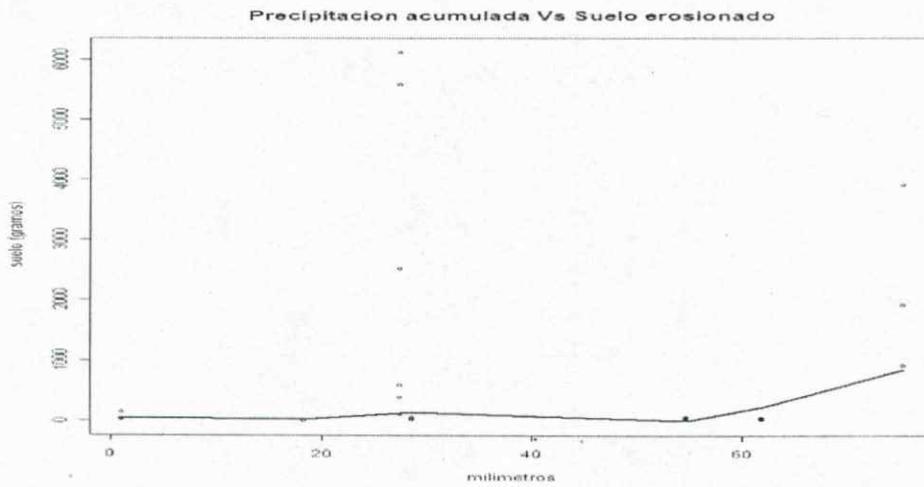


Figura 21. Precipitación acumulada versus suelo erosionado. Primer ciclo

Tabla 15. Coeficientes del modelo lineal con las variables significativas para pérdida de suelo en el segundo ciclo

Coeficientes	Estimate	Std,Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-0.38	22.62	-0.02	0.99	
P2	8.01	28.75	0.28	0.78	
P3	2.03	28.17	0.07	0.94	
P4	-14.20	28.73	-0.49	0.62	
P5	-35.34	28.73	-1.23	0.22	
P6	32.67	28.17	1.16	0.25	
P7	17.00	28.74	0.59	0.56	
P8	10.88	27.28	0.40	0.69	
P9	25.81	28.18	0.92	0.36	
I30p	83.24	18.22	4.57	0.00	***
I45p	-56.23	15.96	-3.52	0.00	***
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 65.74 on 93 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.463, Adjusted R-squared: 0.4053					
F-statistic: 8.02 on 10 and 93 DF, p-value: 3.375e-09					

P: Parcela, I30p: Intensidad promedio en un intervalo de 30 minutos, I45p Intensidad promedio en un intervalo de 45 minutos

Tabla 16. Coeficientes del modelo lineal con las variables significativas para pérdidas de suelo en los dos ciclos de cultivo

Coeficientes	Estimate	Std,Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.554	12.300	0.126	0.899673	
fbbloqB	-3.926	12.427	-0.316	0.752499	
fbbloqC	14.556	11.431	1.273	0.205022	
I15p	10.031	22.949	0.437	0.662709	
I15m	-3.037	1.797	-1.690	0.093317	
I30p	84.098	30.798	2.731	0.007141	**
I45p	-59.822	16.995	-3.520	0.000584	***
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 58,24 on 139 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.447, Adjusted R-squared: 0.4231					
F-statistic: 18.72 on 6 and 139 DF, p-value: 6.899e-16					

2.2. Pérdida de Suelo

2.2.1. Antecedentes

2.2.1.1. La erosión en los Andisoles

La erodabilidad de los suelos es una propiedad muy compleja que depende de la capacidad de infiltración de la lluvia y de la susceptibilidad al desprendimiento de las partículas y su transporte por la escorrentía. Para Whischmeier and Smith, 1978, esta condición estudiada para el cinturón maicero en los Estados Unidos, estaba asociada a la distribución por tamaño de partículas y el contenido de materia orgánica, propiedades que en el modelo de predicción de la pérdida de suelo conocido como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), definieron el factor K (erodabilidad del suelo). Sin embargo en los Andisoles, los suelos objeto de la presente investigación, ambas condiciones no están definiendo esta erodabilidad, debido a que en general estos suelos no dispersan bajo los tratamientos normales de determinación del tamaño de partículas y además sus contenidos de materia orgánica, generalmente son muy altas, debido a la formación de un complejo arcillo-humico (con el alofano y la imogolita), el cual disminuye la mineralización de la materia orgánica.

En este sentido los Andisoles requieren una especial atención en términos de su comportamiento frente al proceso erosivo, debido a que la acumulación de la materia orgánica y la dominancia en las arcillas de materiales “amorfos activos” dirigen a una estructura pedogenica, particularmente estable. Resultados obtenidos en otras partes del mundo también indican que es cuestionable la validez de la estimación convencional de la erodabilidad del suelo, de acuerdo con el USLE, Rodríguez *et al*, 2006.

Es de aceptación general que los Andisoles presentan una gran resistencia a la erosión, debida o asociada a su contenido alto de materia orgánica y a sus excelentes propiedades físicas (retención de humedad, tasas de infiltración, estabilidad estructural).

En los Andisoles la porosidad es muy alta, proporcional con la retención de humedad; los poros están saturados de agua, aún con potenciales bajos, condición asociada a poros menores de 1 micrómetro y obviamente a un bajo tenor de poros gruesos o macroporos

La deshidratación o secado extremo de estos suelos (quemados) cambia el comportamiento hidrodinámico y erosivo de éstos, debido a la presencia dominante de minerales de corto rango (alofano e imogolita), los cuales se organizan y adquieren una forma cuasi-cristalina, generando algunas propiedades hidrofobicas, en este sentido estos materiales se asemejan en su comportamiento a las turbas, Raunet, 1991, citado por Poulénard *et al*, 2001.

Experiencias de campo, en el país, indican que los Andisoles presentan tasas de erosión importantes, especialmente cuando son cultivados en forma intensiva y el excesivo laboreo destruye la estructura. Otros autores a nivel internacional, también reportan esta situación,

Raunet, 1991 Pla Sentis, 1992; Van Wambeke, 1992, Warkentin, 1992; Nishimura *et al*, 1993, citados por Poulenard *et al*, 2001.

Los estudios realizados por Poulenard *et al*, 2001, en Andisoles (Melanudand y Hapludands) en el Ecuador, reportan tasas de infiltración Ks de 60mm/h, las cuales se redujeron a valores de 20 mm/h por las practicas de laboreo y quema en los paramos. Paralelo a esta reducción los coeficientes de erosión se incrementan del orden de tres veces y las tasas de erosión pasan de 80 gr/m² a 1200gr/m². La hidrofobicidad y el sellamiento de poros, asociada con la baja densidad de los materiales, generan escorrentía, que arrastra los agregados estables vía flotación: Una contradicción aparente “erosión de agregados estables”.

El comportamiento hidrodinámico de estos suelos asociado a la conductividad hidráulica, la estabilidad estructural, el sellamiento de poros o encostramiento superficial, el desarrollo de propiedades hidrofobicas en Andisoles no alofanicos (dominancia de complejo Al-Humus), estarían asociadas a la evolución mineralogica de estos suelos, es decir al nivel de cristalinidad que alcancen las arcillas de corto rango, Poulenard *et al*, 2001. La cantidad de estas arcillas es evaluada a través del Si y Al extraído en oxalato acido de amonio o bien por el valor del pH en NaF, siendo este ultimo método solo un indicativo general.

En el estudio de una climosecuencia en Andisoles del Ecuador, Zehetner and Miller. 2006, encuentran que la escorrentía esta correlacionada negativamente con los contenidos de carbóno orgánico, con el pH en NaF, la retención de humedad a 33 y 1500 kPa. Igual correlación se establece con las tasas de erosion. Los coeficientes de escorrentía para estos suelos (situados por encima de los 2800msnm), fueron de menos del 10%.

2.2.1.2. La escala en la evaluación de los procesos erosivos

La escala espacio-temporal es una cuestión critica en la investigación en erosion de suelos. Las tasas de erosión son dependientes de la escala, Boardman, 2006; es claro que la información de erosión que suministran las parcelas experimentales no pueden dar un estimativo real de lo que sucede en el paisaje completo. Los datos obtenidos en las parcelas tradicionales de 22 x 2 m, arrojan valores de perdida de suelo que pueden llegar a ser muy diferentes de los obtenidos en los campos del agricultor, Evans, 1995, citado por Boardman, 2006, sugiere valores del orden de 2 a 10 veces. Sin embargo, Poesen *et al* 2003, citado por Boardman, 2006, consideran particularmente útil, especialmente si las mediciones abarcan un espacio de varios años, la información que proveen las parcelas de escorrentía, en terminos de las tasas de erosión en diferentes cultivos con variadas practicas culturales y como una guía de la erosión. La parcela de escorrentía también es de uso limitado en la exploración de los efectos de eventos extremos de lluvia en la erosión en el paisaje, Baffaut *et al*, 1998, citado por Boardman, 2006.

En nuestro caso específico es obligatorio, tener en cuenta la dimensión de las parcelas de escorrentía (36.5m²) y además el tiempo del ciclo del cultivo fue de seis meses.

2.2.1.2. Los modelos en la pérdida de suelos

La estimación de las pérdidas de suelo por procesos erosivos, ha sido sujeto de la producción de modelos, con los cuales se intenta predecir estas pérdidas, cuantificar las áreas que pueden llegar a tener algún umbral de erosión “catastrófica”, estimar la erosión en áreas donde no se tienen datos, o bien predecir las tasas de erosión cuando se esperan cambios en el uso de la tierra, Boardman, 2006. Los modelos no reproducen la realidad, la simplifican y deben considerarse que están en desarrollo.

El modelo más conocido y de más trayectoria en el país es la Ecuación Universal de pérdida de Suelo, USLE, planteada a partir de investigaciones en el oriente de Estados Unidos, en 1958 por Whischmeier and Smith, 1978. El USLE, es un modelo empírico y simple, debido a la modestia demanda de datos y la estructura transparente del modelo, permanece como la herramienta más popular para evaluación del riesgo de erosión hídrica. La estructura simple de su fórmula, hace fácil o transparente diseñar políticas para escenarios cambiantes de uso de la tierra (factores C y P), bajo determinadas condiciones ecológicas (factores R, K, L y S), Sonnevelda and Nearing, 2003.

Algunas de las críticas que se le plantean al modelo surgen de las diferencias entre algunas condiciones que se presentan en el oriente de USA, donde fue desarrollado el modelo o la ecuación y el resto del mundo, Jetten and Favis- Mortlock (in press) citados por Boardman, 2006, Millington, 2006, citado por Romero, 2007.

En nuestro caso específico hay que considerar las siguientes cuestiones: (1) Las diferencias en las intensidades de la precipitación como diríamos de otra manera, “como llueve en Colombia no llueve en otra parte” (2) La estabilidad de la estructura, tema particularmente diferente para los Andisoles, (3) Los ecosistemas, los relieves, los procesos hidrológicos y los paisajes donde se realiza la agricultura, especialmente muy diferente para nuestro país, (4) los sistemas de cultivos y las prácticas agronómicas muy diferentes.

Finalmente el USLE, considera que la pérdida de suelo es el efecto de multiplicar los factores suelo, lluvia e inclinación de la vertiente, factores que son complejos y además varían en el tiempo. El factor erosividad del suelo K, es considerado una propiedad intrínseca del suelo, un factor independiente de la lluvia y la inclinación del terreno, sin embargo cuando hay sellamiento de poros hay cambios drásticos en términos de la estructura y la permeabilidad, es entonces concebible que K varía concomitantemente con ellos; es decir la tasa de infiltración y de escorrentía y por ende la tasa de desprendimiento de partículas del suelo y la capacidad de transporte de estas, están continuamente cambiando durante el evento de precipitación. En general K es una condición que es dependiente de la infiltración y la escorrentía, Assouline and Ben-Hur, 2006.

La deficiencia de algunos modelos entre ellos WEPP (Water Erosion Prediction Project) and EUROSEM para predecir la erosión, estriban en que consideran que la escorrentía obedece a un flujo Hortoniano, mientras que en realidad mucha de ella es debida a que lluvia, aún de baja intensidad, escurre sobre la superficie, especialmente cuando el suelo esta saturado de agua y su capacidad de infiltración esta al mínimo. Esto obliga a considerar conjuntamente la lluvia, la escorrentía y el suelo, ademas del trabajo multidisciplinario de los investigadores que generan los modelos y de los conocedores de las condiciones y dinamica de los suelos, de la lluvia, al igual que las personas que manejan los cultivos, tal como lo plantea Boardman, 2006.

2.2.1.3. Resultados y discusión

La pérdida de suelo producto de los diferentes eventos de escorrentía, se expresó como suelo seco a 105 °C. Las tablas 17 y 18 presentan las pérdidas de suelo por parcela para el primer y segundo ciclo respectivamente.

La inclinación del terreno, tiene un efecto sobre la pérdida de suelo a partir de 10% de pendiente, con incremento lineal para parcelas con pendiente del 70 %, figura 22, sin embargo, estadísticamente no se observaran diferencias significativas.

En el primer ciclo las parcelas 7, 8 y 9 perdieron 15.620,56 kg/ha de suelo seco a 105 °C, las parcelas 1, 2 y 3 perdieron 843.5 kg/ha de suelo mientras las parcelas No 4, 5 y 6 perdieron 190.93 kg/ha de suelo seco a 105 °C. El total de pérdida de suelo en este ciclo fue de 16.654.99 kg/ha

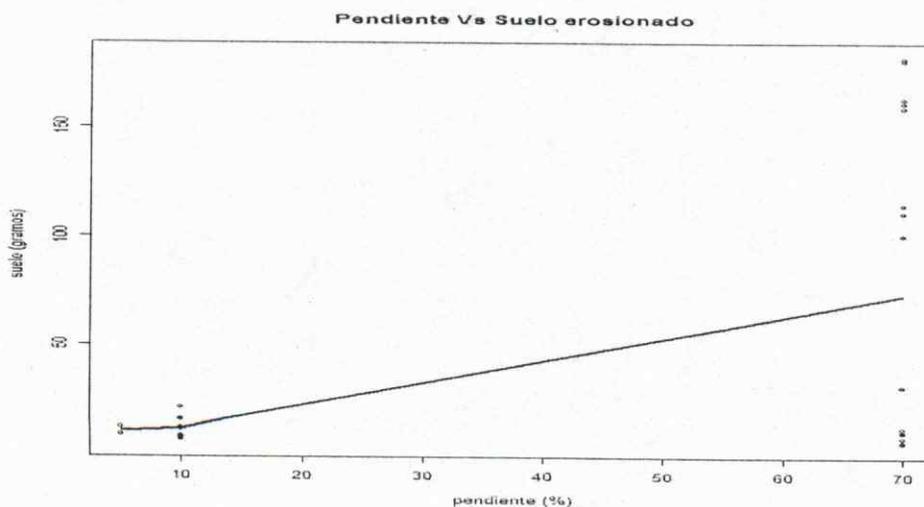


Figura 22 Relación entre la pendiente de la parcela (%) y la pérdida de suelo (gr/parcela) en el primer ciclo.

Tabla No 17. Pérdida de suelo por parcela en el primer ciclo (kg/ha suelo seco a 105°C)

Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Total Suelo
20-Mar-07	28.10	160.91	106.67	14.96	0.00	2.00	1674.17	734.41	1539.66	4260.89
10-Abr-07	33.42	15.56	32.91	0.00	0.00	0.00	1071.75	251.07	530.03	1934.75
20-Abr-07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.75	1.74
24-Abr-07	9.31	5.58	29.02	12.46	0.00	5.77	778.91	21.50	227.02	1089.56
26-Abr-07	4.03	0.96	9.80	4.29	0.00	1.98	575.58	38.34	684.93	1319.90
2-May-07	5.85	0.18	3.55	0.00	0.00	0.00	12.91	0.00	15.83	38.31
10-May-07	4.72	0.00	5.74	0.10	0.00	0.00	0.09	7.68	8.62	26.95
22-May-07	6.03	0.00	20.04	11.56	0.00	0.00	16.93	0.00	16.00	70.56
24-May-07	21.07	23.70	11.02	11.47	0.00	5.72	898.08	1078.14	888.46	2937.66
29-May-07	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	819.61	617.35	1087.41	2524.37
1-Jun-07	19.95	97.04	92.81	8.18	13.14	20.70	131.67	148.11	304.55	836.15
5-Jun-07	9.59	73.08	12.85	14.70	21.74	42.17	584.78	444.68	410.55	1614.15
Total Suelo	142.07	377.02	324.40	77.72	34.88	78.33	6565.49	3341.28	5713.79	16.654.99

En el segundo ciclo las parcelas 7,8 y 9 perdieron 33.412,87 kg/ha de suelo seco a 105 °C, las parcelas 1, 2 y 3 perdieron 24.957,23 kg/ha de suelo mientras las parcelas 4, 5 y 6 perdieron 15.423,99 kg/ha de suelo seco a 105 °C. El total de pérdida de suelo en este ciclo fue de 73.794.08 kg/ha se suelo, lo que significa una pérdida 4,43 veces mas alta que en el primer ciclo de cultivo. Este mayor valor se explica por las condiciones de verano intenso en el primer ciclo, a su vez asociadas a la alta capacidad de retención de humedad de estos suelos (a 30 kPa es cercana a 130%), la alta tasa de infiltración (propia de los Andisoles) y a los problemas en la medición que pudieron haberse presentado en el primer ciclo, por efecto de captura de los sedimentos.

La herramienta estadística no permitió discriminar diferencias en la pérdida de suelo para los diferentes pendientes, debido a la alta variabilidad presentada por el suelo perdido en las parcelas ubicadas en este rango de inclinación, situación que puede ser producto de factores como el muestreo, cobertura o otras variables no controladas. El modelo general de pérdida de suelo encontrado, para la pendiente o inclinación del terreno, permite explicar el 10% del suelo perdido, lo cual indica que la inclinación de la vertiente no es el factor que más contribuye a la erosión de los suelos.

Cuando se considera el modelo del USLE, obviamente salta a la vista que en este modelo los factores de la ecuación tienen igual peso, sin embargo estadísticamente para el caso nuestro, la participación porcentual de los factores es diferente, no solo para el factor pendiente o inclinación del terreno, sino para el factor precipitación, tal como se planteo en el numeral anterior (2.1).

La variable pendiente analizada presenta un fuerte contraste en los intervalos de confianza de los valores observados de pérdida de suelo. Como se ve en el análisis estadístico no existe diferencia significativa (0,05%) para los valores de baja pendiente (5 – 10%) y aun para los valores de pendiente alta (70%) las pérdidas de suelo solo se incrementan en aproximadamente 100 gramos bajo intensidades de aguaceros similares, mientras la intensidad del aguacero ocasiona incrementos de pérdidas de hasta 2 kilogramos por evento para el área de las parcelas.

La precipitación acumulada no presenta una relación directa con las cantidades de suelo perdido, figura 21, solo se relaciona indirectamente con pérdidas de suelo a precipitaciones acumuladas superiores a 60 mm. Si analizamos en detalle este hecho teniendo en cuenta que las frecuencias mínimas erosivas no bastarían para provocar esta intensidad acumulada en un intervalo de pocos días, podríamos afirmar que para alcanzar estos valores acumulados, se requiere por lo menos de un evento de alta precipitación en intervalos de 8 a 10 o de 12 a 14 mm en los valores de I-15 o I-30, como lo ilustra el análisis de significancia (varianza) para el modelo propuesto.

Para el primer ciclo de cultivo la variable que mejor explica el proceso erosivo, es la intensidad máxima. Las intensidades I-15 superiores a 5 mm generan la erosión, para I-30 son de 6 mm, para I-45 son 7,5 mm, para I-60 son de 11 mm y a partir de estos valores es creciente la pérdida de suelo, salvo en I-30 e I-45, donde a partir de 11 mm el proceso se estabiliza, figuras 9, 10, 11 y 12. Esto permite concluir que I-15 máxima es la variable que mejor explica el proceso erosivo en este ciclo.

El análisis de las intensidades de los aguaceros a intervalos de 15 minutos, muestra que dos terceras partes de las precipitaciones presentadas están por debajo del límite de precipitación crítica que genera pérdidas de suelos (5 mm), en tanto una tercera parte de los aguaceros esta por encima de dicho valor, de los cuales la mayor frecuencia corresponde a aguaceros de 12–14 mm con muy alto potencial erosivo (pérdidas promedio de 2,000 gramos de suelo por evento, equivalentes a 540 kg de suelo/ha por evento).

En el segundo ciclo de cultivo, el proceso erosivo se explica mejor por la variable de intensidades promedio, más que las intensidades máximas, figuras 17, 18, 19 y 20. En este segundo ciclo, las intensidades promedias I-15 críticas o umbrales de erosión están alrededor de los 2 mm, con un máximo (de erosión) cercana a los 3 mm, y es creciente pero con una inclinación suave hasta intensidades de 10 mm, figura 17. Un comportamiento similar presenta I-30, pero la tasa de incremento hasta 10 mm es mucho mas pronunciada, figura 18. La intensidades I-45, presenta un umbral similar a las dos intensidades anteriores, pero tiene entre 3- 6,5 mm una estabilidad en las tasas de pérdida de suelo y a partir de este valor se incrementan las pérdidas de suelo. Situación similar se presenta para I-60, figuras 19 y 20.

Las intensidades máximas I-15, I-30, I-45, I-60, en el segundo ciclo, no representan o explican el proceso erosivo en forma adecuada; el comportamiento es muy errático, como

puede verse en las figuras 13, 14, 15 y 16, en general presenta un máximo de erosión a 6mm, 7mm, 8mm y a 12mm para las I-15, I-30, I-45, I-60 respectivamente, este máximo erosivo disminuye hasta cuando las intensidades alcanzan valores de 10 mm, 14 mm, 14 mm y 16 mm respectivamente para las intensidades mencionadas y posteriormente a medida que la intensidad en mm aumenta, la erosión del suelo se incrementa. El modelo estadístico para este segundo ciclo se encuentra en la tabla 15, el cual sugiere que I-30 e I-45 promedio explican el proceso erosivo en un 40.25%

Estos comportamientos sugieren que el suelo es relativamente “más sensible” al proceso erosivo en este segundo ciclo de cultivo. Para explicar esta “sensibilidad”, debe tenerse en cuenta que el suelo tiene una capacidad muy alta de absorber agua y en el primer ciclo, los dos primeros meses (Enero, Febrero) del cultivo fueron de muy poca precipitación (31,3 mm), mientras que para el segundo ciclo el suelo presenta un nivel de humedad mayor y por ende la escorrentía es mayor. Además su estructura varía (se desmenuza el suelo) por efecto del laboreo en el primer ciclo, por lo que se hace más susceptible al arrastre por la escorrentía generada por el aguacero. Por otro lado el comportamiento de la precipitación durante el primer semestre es diferente al de segundo semestre, en este último se presentan para cada intensidad dada de I-30 y de I-45), aguaceros de mayor duración.

La pérdida de suelos con relación a la intensidad de la lluvia, no tiene un comportamiento lineal, el comportamiento del fenómeno es aleatorio, tiene periodos de poca efectividad, seguido de periodos de pérdida de suelo creciente, luego de estabilidad y finalmente crecientes, comportamiento asociado a la presencia de umbrales críticos.

Esta situación muestra una debilidad del modelo del USLE, el cual considera que el I-30, es un indicativo de la erodabilidad de la lluvia y tal como plantea Boardman, 2006, la intensidad de la lluvia tiene un efecto diferencial, de acuerdo con las condiciones del suelo, tal como reza el dicho popular: “El palo no está todos los días para hacer cucharas”.

El modelo estadístico de la pérdida de suelo para los dos ciclos de cultivo, tabla 16, indica que I-15 máximo está en el rango de significancia para la erosión del suelo y las variables que tienen un mayor peso durante los dos ciclos son las intensidades promedio I-30 e I-45, las cuales explican el proceso en un 42.31%, el cual se considera adecuado. Debe tenerse en cuenta que para el primer ciclo, I-15 máxima era la variable responsable del proceso erosivo. En el segundo ciclo la cantidad de erosión es mayor y por ende las variables responsables del proceso erosivo (I-30 e I-45 promedio) deben tener más peso cuando se consideran los dos ciclos.

Como se observa en las figuras mencionadas la intensidad crítica que puede generar pérdidas de suelo importantes para cada intervalo creciente de 15 minutos (15,30,45,60) corresponde aproximadamente a valores incrementales de 2 mm en las cantidades de lluvia en dicho intervalo a partir del valor inicial de 5 mm (5,7,9,11). Este dato concuerda con la tasa de infiltración básica (cerca a los 0,3 mm por minuto es decir 4.5 mm/15minutos) calculada por (Jaramillo D. F. 2002 p. 228) en un Andisol del oriente Antioqueño. Esta tasa de infiltración básica es similar (2 cm./h) a la reportada para Andisoles cultivados en el

Ecuador por Poulénard *et al*, 2001, lo que se traduce en que a partir de este valor de precipitación se genera escorrentía, adicionalmente debe tenerse en cuenta que los valores de precipitación de I-15 están incluidos en los estimados de intervalos mayores (I-30, I-45, I-60), que indica la intensidad promedio mensual (I-15, I-30 I-45 y I-60), en milímetros de precipitación. Esto genera en el modelo una dependencia de las variables intensidad por intervalo de tiempo, y provoca una dependencia de variables: Precipitación e intervalo de tiempo que se hizo muy evidente en el primer ciclo del cultivo (baja precipitación y alta intensidad I-15) pero que en el segundo ciclo determino un efecto mas marcado de las variables I-30 e I-45 en virtud de la distribución de aguaceros mas prolongados pero de menor intensidad promedio. Lo anterior indica que la escogencia de una variable permanente de intensidad, I-30 para Wischmeier and Smith, 1978, no es correcto desde el punto de vista del modelamiento, e implica un análisis mas detallado en el tiempo de la pluviosidad y sus efectos en la escorrentía y erosión.

2.3. Escorrentía

Los valores de la escorrentía están generalmente asociados a las perdidas de suelo, movimiento de iones fertilizantes y pesticidas agrícolas fuera de las áreas de producción hacia las fuentes de agua y otros ecosistemas, por esta razón generalmente se culpa a la agroproducción del deterioro continuo de los recursos naturales, olvidando su aporte vital y fundamental al abastecimiento, seguridad y soberanía alimentaria del país tanto como su contribución al desarrollo agroindustrial de varios sectores de la economía (alimentos, bebidas, manufactura, entre otros).

La tabla 19, indica las pérdidas de agua por escorrentía, expresadas en L/ha, estas pérdidas están asociadas a las mismas variables de las pérdidas de suelo: intensidad máxima I-15 en el primer ciclo e intensidad máxima promedio de I-30 e I-45 en el segundo ciclo. Los valores máximos se presentaron el 6 de noviembre del 2007, un valor de 67620,93L/ha, o 67,621 m³ cúbicos de agua/ha, cantidad bastante significativa.

El modelo estadístico para relacionar la escorrentía y la precipitación se encuentra en la tabla 20, las diferentes variables de precipitación explican el proceso de escorrentía en un 81,25%, lo cual es un factor de correlación muy alto. Llama la atención que la escorrentía no esta asociada con mucho peso a variables como la cobertura del cultivo (área foliar) ni a la inclinación del terreno, ni a las practicas culturales (aporque del cultivo, trazado de surcos, etc.).

2.4. Perdida Iónica

2.4.1. Introducción

La perdida de nutrientes o erosión química es una de los problemas que dirigen o conducen a una degradación del ambiente, tanto por el impacto negativo en las fuentes de agua como en el estado de fertilidad natural de los suelos.

La erosión del suelo es una forma de transporte de sedimentos suspendidos en el flujo superficial, frecuentemente asociados a nutrientes, N, P, K, etc., tanto en solución como en material particulado; es entonces un mecanismo de transferencia de estos elementos del suelo a los cuerpos de agua.

Tabla No 18. Pérdida de suelo por parcela en el segundo ciclo (kg/ha suelo seco a 105°C)

Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Total suelo
25-Sep-07	0.00	0.00	7.73	0.00	0.00	0.00	0.00	5.25	0.00	12.97
28-Sep-07	94.65	287.52	376.78	1.24	0.39	11.20	0.00	11.80	0.00	783.59
2-Oct-07	102.90	944.93	1586.26	18.48	11.27	293.69	0.00	280.89	0.00	3238.41
3-Oct-07	78.95	0.00	429.06	100.88	48.03	145.25	842.67	189.44	270.99	2105.27
5-Oct-07	69.87	429.70	57.79	69.36	953.28	327.58	1550.18	1328.11	1277.60	6063.46
9-Oct-07	361.91	655.75	514.32	150.97	140.16	427.17	375.34	1073.17	2038.19	5736.98
10-Oct-07	59.32	58.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	118.11
11-Oct-07	536.35	389.85	626.21	329.75	385.38	400.76	685.64	610.66	508.09	4472.69
16-Oct-07	132.71	136.40	541.71	135.24	79.95	275.71	97.31	182.31	946.06	2527.40
18-Oct-07	394.98	811.77	515.64	456.80	392.62	555.98	1268.05	1087.74	1158.37	6641.96
22-Oct-07	1954.10	2990.76	2101.14	1435.52	119.04	554.35	1325.52	2319.53	1303.57	14103.53
25-Oct-07	1091.54	1036.60	1024.11	770.99	134.95	577.72	722.29	892.33	1233.93	7484.47
26-Oct-07	254.82	129.66	384.63	340.92	59.85	1592.46	630.39	433.61	628.13	4454.48
29-Oct-07	431.80	250.27	598.29	6.71	358.61	387.60	278.44	299.05	252.37	2863.12
2-Nov-07	0.00	3.69	11.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48	16.26
6-Nov-07	703.21	522.93	254.39	89.85	542.14	1198.61	305.87	738.83	991.77	5347.60
13-Nov-07	13.69	5.06	19.50	2.20	1.44	115.19	195.48	62.52	67.44	482.52
20-Nov-07	73.79	50.96	35.09	39.74	27.96	299.29	128.15	79.43	56.66	791.06
4-Dic-07	19.76	6.75	28.83	7.90	5.69	129.63	173.47	48.35	25.66	446.04
11-Dic-07	47.47	4.31	135.24	29.96	33.14	235.27	389.30	296.17	271.92	1442.77
14-Dic-07	19.17	0.60	83.64	5.09	0.00	236.02	385.39	347.68	215.61	1293.21
18-Dic-07	0.00	0.00	55.57	0.00	0.00	79.73	167.50	109.68	89.45	501.93
21-Dic-07	9.20	0.00	242.53	21.87	0.00	64.26	315.71	129.54	251.34	1034.46
26-Dic-07	13.85	0.00	147.34	9.00	0.00	157.82	308.69	276.74	400.20	1313.65
10-Jun-08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.36	304.44	66.81	104.56	518.16
Total suelo	6464.05	8716.30	9776.88	4022.45	3293.90	8107.64	10449.83	10869.63	12093.40	73.794.08

El fósforo es un elemento esencial en la producción agrícola y animal, sin embargo acelera la eutroficación de los cuerpos de agua, un problema de escala mundial. Hoy en día en los países en desarrollo constituye una de las formas más ubicuas de deterioro de la calidad del agua; es un nutriente de largo plazo para la biota acuática y está asociado a las explosiones de crecimiento de algas (Cianobacterias y Pfiesteria) peligrosas para la salud humana. Estas algas han incrementado la conciencia social del problema de la eutroficación, debido a que contribuyen a la muerte de los peces, deteriora la calidad del agua para consumo humano, forma compuestos carcinogénicos durante la clorinación del agua y tiene nexos con problemas neuronales en seres humanos, Burkholder and Glasgow, 1997; Kotak *et al*, 1993, citados por Sharpley *et al*, 2001.

La agricultura es una fuente importante de P, para el medio ambiente, en especial los sistemas de cultivos intensivos en el uso de fertilizantes, bien orgánicos o inorgánicos, la papa entre ellos; en estos sistemas se aplica un exceso de P por encima de las requerimientos o extracciones del cultivo, incrementando la posibilidad de transferir P del suelo a los cuerpos de agua.

La calidad del agua ha forzado a que en U.S.A. se desarrollen recomendaciones para la aplicación de P en las tierras (cultivadas y en pasturas) y en el manejo de las cuencas basados en el potencial de pérdida de P por erosión en los campos cultivados, Sharpley *et al*, 1996, USDA-USEPA, 1999 citados por Sharpley *et al*, 2001. Por ejemplo en el estado de Kansas cuando los suelos tienen por encima de 100-200 ppm de P (Bray 1) los productores de cerdos deberían eliminar la aplicación de los estiércoles, en Ohio, por encima de 150 ppm de P (Bray 1), el agricultor debe eliminar las adiciones de P o realizar prácticas que disminuyan la erosión. Obviamente estos contenidos o niveles de P en el suelo, no son los adecuados desde un punto de vista de manejo ambiental del problema, debido a que no dan indicaciones de los procesos que controlan el transporte de P en la escorrentía superficial y en el flujo subsuperficial. Dos suelos pueden tener el mismo nivel de P, pero pueden diferir en la potencialidad que tienen para suministrar P a las fuentes de agua, debido a la susceptibilidad diferencial a la escorrentía y la erosión del suelo.

En el caso específico de los Andisoles, los contenidos de fósforo son relativamente bajos (8-10 ppm, Bray 2), además estos suelos tienen una gran capacidad para retener fosfatos, por definición al menos el 85% del P aplicado en una solución, es fijado por los minerales secundarios del suelo: Alofano, imogolita.

La transferencia de P del suelo a los cuerpos de agua, está localizada en suelos con alta saturación (contenido nativo o adicionado) de P y en áreas que muestren una conectividad directa a las corrientes de drenaje, Schoumans and Breeuwsma, 1997, citado por Sharpley *et al*, 2001. En Antioquia, las áreas donde se cultiva la papa, cumplen estos requisitos de conectividad con las corrientes de drenaje: *Las obras de agroingeniería* requeridas en el cultivo para facilitar la evacuación de las aguas lluvias (excesivas en los climas húmedos), generan una conexión directa con las fuentes de agua, la *fertilización fosfórica en el cultivo*

de la papa es alta. Factores que disminuyen la posibilidad de transferencia P desde estos suelos (Andisoles), a los cuerpos de agua incluyen: La fijación de P, los contenidos bajos a muy bajos de fosforo y la resistencia intrínseca a la erosión de estos suelos.

Tabla 19. Estadísticas Descriptivos para Escorrentía L/ha

Estadísticos Descriptivos para Escorrentía L/ha							
Fecha	min	máx	range	median	mean	std,dev	coef,var
13-Jun-07	19.18	520.55	501.37	87.67	190.57	198.37	1.04
11-Jul-07	0	821.92	821.92	273.97	308.98	317.74	1.03
17-Jul-07	13.7	427.4	413.7	295.89	227.4	168.57	0.74
24-Jul-07	347.95	3561.64	3213.69	1369.86	1636.22	948.3	0.58
7-Ago-07	0	547.95	547.95	0	143.08	206.73	1.44
21-Ago-07	2.74	1780.82	1778.08	821.92	783.56	539.58	0.69
28-Ago-07	0	1369.86	1369.86	0	535.46	640.4	1.2
31-Ago-07	145.21	821.92	676.71	630.14	524.05	230.66	0.44
4-Sep-07	0	394.52	394.52	32.88	94.06	131.24	1.4
14-Sep-07	112.33	663.01	550.68	202.74	245.81	164.81	0.67
18-Sep-07	0	0	0	0	0	0	NaN
21-Sep-07	32.88	953.42	920.54	610.96	505.33	399.12	0.79
25-Sep-07	98.63	2021.92	1923.29	821.92	779.3	645.2	0.83
28-Sep-07	257.53	11024.66	10767.13	1983.56	3974.43	4235.12	1.07
2-Oct-07	1643.84	17808.22	16164.38	13150.68	10814.31	6505.45	0.6
3-Oct-07	68.49	16986.3	16917.81	6849.32	7191.78	6352.16	0.88
4-Oct-07	2.74	200	197.26	60.27	82.5	70.34	0.85
5-Oct-07	13320.55	18115.07	4794.52	16767.12	16340.34	1499.35	0.09
9-Oct-07	23561.64	55205.48	31643.84	46027.4	42396.96	9840.85	0.23
11-Oct-07	38630.14	52054.79	13424.65	45753.42	45738.2	3625.9	0.08
12-Oct-07	38.36	1128.76	1090.4	1024.66	2586.8	4162.12	1.61
16-Oct-07	14246.58	48219.18	33972.6	38356.16	33546.42	11374.08	0.34
18-Oct-07	15616.44	45953.42	30336.98	28219.18	29807.91	11247.29	0.38
22-Oct-07	30136.99	49589.04	19452.05	44931.51	41248.1	6711.09	0.16
25-Oct-07	44856.6	51290	6433.4	47330.98	47969.29	2154.99	0.04
29-Oct-07	44383.56	61369.86	16986.3	47123.29	50197.87	5644.4	0.11
2-Nov-07	1369.86	9589.04	8219.18	5753.42	6453.58	2457.6	0.38
6-Nov-07	35948.82	67620.93	31672.11	44856.6	46616.16	9014.07	0.19
13-Nov-07	0	0	0	0	0	0	NaN
20-Nov-07	15217.07	38423.2	23206.13	28525.67	27321.87	8065.44	0.3
4-Dic-07	0	0	0	0	0	0	NaN
11-Dic-07	46341.23	56504.11	10162.88	47330.98	48853.05	3336.08	0.07
14-Dic-07	3781.83	45846.35	42064.52	39165.52	33666.89	13309.89	0.4
18-Dic-07	12689.61	49310.49	36620.88	45846.35	41749.87	11285.68	0.27
21-Dic-07	28030.79	48320.74	20289.95	46836.11	44691.64	6409.56	0.14
26-Dic-07	45846.35	51784.87	5938.52	47330.98	48128.28	1978.65	0.04
10-Jun-08	684.93	25061.53	24376.6	4771.59	8072.84	8171.17	1.01

NaN: No hay dato

Recientes investigaciones sugieren que la transferencia del P del suelo a los cuerpos de agua, se origina en pequeñas áreas en las cuencas, durante eventos de precipitación extrema, un factor temporal y espacialmente variable. Estas transferencias coinciden con eventos que potencialmente generan mucha escorrentía y con sectores donde hay mucho P en el suelo o se han aplicado altas dosis de éste, vía fertilización orgánica o inorgánica, Sharpley *et al*, 2001. En presencia de Fe, el fósforo disuelto se coprecipita, reduciendo la transferencia del P al cuerpo de agua y por lo tanto la eutroficación es de menor magnitud, Kleeberg, A. *et al*, 2008.

En esta investigación los resultados apoyan la tesis de Sharpley *et al*, 2001, sobre la relación de los eventos de lluvia que generan escorrentía y la pérdida de P, por lo tanto la erosión del fósforo, puede minimizarse si se evitan aplicaciones de fosfatos, cuando se esperan lluvias intensas.

El valor máximo de P reportado en este trabajo, fue de 0,90 mg P/L, un poco inferior al máximo reportado (0,19-1,26 mg P/L), por Robertson and Nash, 2008, en la parte SW de Victoria, Australia, una zona con pastoreo de ovejas y una precipitación entre 550-750 mm/año.

Tabla 20. Coeficientes para el modelo lineal de escorrentía en función de precipitación. Primer ciclo

Coeficiente	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	142306.00	18361.00	7750.00	0.00	***
Par F2	-3486.00	11881.00	-293.00	0.77	
Par F3	-14868.00	6417.00	-2317.00	0.03	*
Par F4	-23065.00	8963.00	-2573.00	0.02	*
Par F7	-7690.00	6511.00	-1181.00	0.25	
Par F8	-41226.00	7149.00	-5767.00	0.00	***
Par F9	-12144.00	6511.00	-1865.00	0.08	
PpMaxp	105772.00	18469.00	5727.00	0.00	***
PpAcp	-15601.00	2884.00	-5410.00	0.00	***
Pp15p	413314.00	70000.00	5904.00	0.00	***
Pp30p	-797282.00	141899.00	-5619.00	0.00	***
Pp45p	867540.00	162054.00	5353.00	0.00	***
Pp60p	-526985.00	97724.00	-5393.00	0.00	***
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 10.15 on 16 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.8928, Adjusted R-squared: 0.8125					
F-statistic: 11.11 on 12 and 16 DF, p-value: 1.359e-05					

Par: Parcela, **PpMaxp:** Precipitación máxima entre dos evaluaciones, **PpAcp:** Precipitación acumulada entre dos evaluaciones, **Pp15p:** Intensidades promedias de 15 minutos entre dos evaluaciones **Pp30p:** Intensidades promedias de 30 minutos entre dos evaluaciones **Pp45p:** Intensidades promedias de 45 minutos entre dos evaluaciones **P60p:** Intensidades promedias de 60 minutos entre dos evaluaciones.

2.4.2. Pérdida de nutrientes: Resultados y discusión

Los análisis descriptivos para cada uno de los iones, presentes en las aguas de escorrentía: P, Ca, Mg, K, Na, Fe, B, expresados en mg/ha, para 25 mediciones realizadas durante los dos ciclos de cultivo (11 en el primer ciclo y 14 en el segundo ciclo), según el tratamiento de fertilización y la inclinación del terreno se encuentran en las tablas 21 y 22.

Los coeficientes del modelo lineal de la concentración iónica (P, Ca, Mg, K, Na, Fe, B) en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques al azar, se encuentran en las tablas 23, 24, 25, 26, 27, 28 y 29. El análisis estadístico permite deducir que las pérdidas iónicas no están directamente asociadas a la cantidad de fertilizante adicionado, ni a la inclinación del terreno. En esencia estas pérdidas iónicas están asociadas a la precipitación y a la escorrentía, en este sentido se concuerda con los planteamientos de Sharpley *et al*, 2001.

En las aguas de escorrentía, el valor máximo de P, 41,707 mg/ha, fue obtenido en la medición de octubre 25 de 2007, en el tratamiento de 3000 kg de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 5%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) fue de 6,042,44 mg/ha. El total de P recolectado en las mediciones es de 1,073,940,27 mg/ha es decir 1,07 kg /ha (2,45 kg/ha de P₂O₅, lo que corresponde a un 0.0000204% del P₂O₅ aplicado).

De los elementos mayores el fósforo, es el que menos se pierde por escorrentía, debido especialmente a la naturaleza de la mineralogía de los Andisoles, que por definición retienen más del 85% de fosfatos, sin embargo, ambientalmente el fosfato en los cuerpos de agua, es muy contaminante, debido en parte a la dificultad para removerlo. Estos valores de pérdida están en rangos normales reportados en otros países del mundo, especialmente U.S.A., pero en otros tipos de suelos, Sharpley *et al*, 2001.

La erosión es un mecanismo de transporte de P que preferencialmente remueve las partículas finas del suelo, por lo tanto el contenido de P del material erodado y su reactividad es usualmente mayor en el material erodado que en el suelo fuente o original. Sharpley *et al*, 2001. Los resultados aquí obtenidos muestran que el P en el material del suelo erodado es del orden de 5,8 ppm en promedio, mientras que el contenido promedio del suelo, previo al experimento, es de 9,7 ppm, tabla 30, contrario a lo planteado por estos autores, explicable seguramente por la naturaleza mineralógica de los Andisoles, tipo de suelos en los que se realizó el experimento.

En la medición de octubre 9 de 2007, en el tratamiento de 3000 kg de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 5%, se obtuvo el valor máximo de Ca, 341,266,92 mg/ha, fue obtenido El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) es de 57,555,26 mg/ha. El total de Ca recolectado en las mediciones es de 10312796.22 mg/ha es decir 10,31 kg/ha (14,434 kg de CaO/ha). De los elementos mayores el Ca, es el segundo en orden de pérdida por escorrentía, por debajo del K, situación explicable en parte por su movilidad en el medio y su contenido en el suelo.

primer cultivo. El análisis estadístico indica que I-15m, I-15p e I-30p, son variables altamente significativas en la pérdida del potasio.

Tabla 22. Análisis descriptivo para cada uno de los iones (mg ha^{-1}) según la pendiente del terreno. Mediciones (25) en los dos ciclos de cultivo

Ión	Pend. %	min	max	range	median	mean	var	std.dev	coef.var
P	5	0.00	39469.09	39469.09	859.51	4383.80	76836170.00	8765.62	2.00
	10	0.00	41707.11	41707.11	1735.07	6042.44	102929200.00	10145.40	1.68
	70	0.00	38462.18	38462.18	1101.37	3892.97	64107010.00	8006.69	2.06
Ca	5	0.00	341266.90	341266.90	14803.61	41988.33	4323743000.00	65755.18	1.57
	10	0.00	243377.80	243377.80	50344.56	57555.26	3079761000.00	55495.59	0.96
	70	0.00	176288.30	176288.30	35136.88	37960.37	1479889000.00	38469.32	1.01
Mg	5	0.00	89495.67	89495.67	4346.93	11576.47	270300300.00	16440.81	1.42
	10	0.00	65643.48	65643.48	15382.07	18712.49	336501400.00	18343.97	0.98
	70	0.00	45280.55	45280.55	7990.68	9210.59	91455310.00	9563.23	1.04
K	5	0.00	694292.60	694292.60	15746.44	68999.16	13827310000.00	117589.60	1.70
	10	0.00	780139.60	780139.60	53666.43	118660.50	26137570000.00	161671.20	1.36
	70	0.00	413238.00	413238.00	60736.26	85797.53	9548245000.00	97715.12	1.14
Na	5	0.00	24753.29	24753.29	3340.65	4631.81	29760580.00	5455.33	1.18
	10	0.00	38074.72	38074.72	4133.61	5909.42	49814270.00	7057.92	1.19
	70	0.00	12009.71	12009.71	3904.98	4006.24	13028360.00	3609.48	0.90
Fe	5	0.00	144986.30	144986.30	1331.73	12958.91	695664700.00	26375.46	2.04
	10	0.00	91782.08	91782.08	2520.55	13482.56	574639300.00	23971.64	1.78
	70	0.00	111813.70	111813.70	4734.25	16739.39	799736700.00	28279.62	1.69
B	5	0.00	3036.08	3036.08	0.00	297.17	474221.00	688.64	2.32
	10	0.00	7600.00	7600.00	0.00	565.45	1542447.00	1241.95	2.20
	70	0.00	2612.05	2612.05	0.00	343.58	406088.39	637.25	1.85

El valor máximo de Na, 38,074,72 mg/ha, fue obtenido en la medición de octubre 9 de 2007, en el tratamiento de 1500kg de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 10%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) es de 5,909,42 mg/ha. El total de Na recolectado en las mediciones es de 1,091,060,44 mg/ha mg/ha, es decir 1.09 kg/ha. Las pérdidas de este elemento son muy bajas, similar a las del fósforo, explicable por la no aplicación de este elemento en el experimento y a sus bajas concentraciones en estos suelos.

En las aguas de escorrentía el valor máximo de Fe, 144,986,30 mg/ha, fue obtenido en la medición de octubre 16 de 2007, en el tratamiento de 3000 kg de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 5%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) es de 16,739,39 mg/ha. El total de Fe recolectado en las mediciones es de 3,238,564,17 mg/ha mg/ha, es decir 3,24 kg/ha. Las pérdidas de este elemento son muy interesantes, debido a el Fe solo es soluble, es decir se pierde por escorrentía, cuando esta en estado reducido (Fe^{+2}), esto sucede cuando el ambiente edáfico esta en condiciones anaeróbicas o

reductoras, lo cual no corresponde con la situación del cultivo. Como el ambiente del experimento es oxidante, estas pérdidas de Fe deben ser explicadas a través de quelatos de Fe, formados entre este y las sustancias húmicas y otros materiales de naturaleza orgánica, los cuales estuvieron presentes en las aguas de escorrentía.

El valor máximo de B, 7,600,0 mg/ha, fue obtenido en la medición de octubre 16 de 2007, en el tratamiento de 3000 kg de fertilizante y en las parcelas con una inclinación del 10%. El valor promedio obtenido en todas las mediciones (25) es de 565,45 mg/ha. El total de B recolectado en las mediciones es de 90,465,02 mg/ha mg/ha, es decir 0,09 kg/ha. Las pérdidas de este elemento son muy bajas, explicable por las bajas concentraciones en estos suelos.

En general existe una tendencia, estadísticamente no significativas, de pérdida de elementos iónicos (fertilizantes) asociada con las dosis de aplicación, con las épocas de labores culturales (aporque) y con las épocas de máxima precipitación (finales de abril y octubre). Las pérdidas iónicas no están asociadas a la inclinación de la vertiente, de manera estadísticamente significativa.

Estas pérdidas iónicas, vía escorrentía, son muy bajas con relación a lo que se aplica y/o lo que presenta el suelo originalmente.

La tabla 30, obtenida a partir de los datos analíticos de la tabla 31, indica que la mayoría de los iones presentes en el suelo erosionado, se encuentran en cantidades mucho mayores que en el suelo original, previo al experimento, a excepción del Fe y del P. El contenido de Ca presente en el suelo erosionado, es 253,4% mayor, el de K es 217,1%, el Mg es 214,9%, la CICE es 193,6%. El contenido de P disminuye en un 60%, por la razón previamente planteada, el Fe disminuye en 92,5%, debido a que su movilidad, fundamentalmente es vía quelación o complejación con las sustancias húmicas del suelo.

Tabla 23. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Ca en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques

Intercepto	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
	75050988	13182946	5693	1.05E-007	***
pend	-64381	143104	-450	654	
ttoF2	729	4114	177	860	
I15m	-5614768	1266556	-4433	2.21E-005	***
I15p	43083734	23024976	1871	64	,
I30p	-2557815	24683677	-104	918	
I45p	-2.3E+07	14069764	-1600	112	
Signif, code s: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 ',' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 43450 on 110 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0,1959, Adjusted R-Squared: 0,152					
F-statistic: 4,467 on 6 and 110 D F, p-value: 0,00439					

I15p: Promedio de intensidad de los aguaceros de 15 min entre medición y medición, etc.

Tabla 24. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de P en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques

Intercepto	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	232.72	1927.88	121	904	
FbloqueB	2236.52	1526.70	1465	146	
FbloqueC	-15.85	1526.70	-10	992	
Ftto1500	446.79	1526.70	293	770	
Ftto3000	642.29	1526.70	421	675	
I15m	515.40	1275.71	404	687	
I30m	-2167.36	2002.16	-1083	282	
I60m	356.40	986.12	361	719	
I15p	55594.22	4256.61	13061	< 2e-16	***
I30p	-52526.81	5856.19	-8969	1.25e-14	***
I45p	45287.73	5684.60	7967	2.07e-12	***
I60p	-23435.41	4491.99	-5217	9.20e-07	***
Signif, code s: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 ' ' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 6408 on 105 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.7296, Adjusted R-squared: 0.7013					
F-statistic: 25.75 on 11 and 105 DF, p-value: < 2.2e-16					

Tabla 25. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Mg en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques

Intercepto	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	14612.2	3759.8	3.886	0.000178	***
FbloqueB	8801.3	2977.4	2.956	0.003849	**
FbloqueC	484	2977.4	0.163	0.871192	
Ftto1500	735.1	2977.4	0.247	0.805471	
Ftto3000	473	2977.4	0.159	0.874083	
I15m	2637.3	2487.9	1.06	0.291566	
I30m	-7087	3904.7	-1.815	0.072382	,
I60m	3535.4	1923.2	1.838	0.068845	,
I15p	902.7	8301.4	0.109	0.913613	
I30p	16442	11421	1.44	0.152948	
I45p	-32105.1	11086.4	-2.896	0.004601	**
I60p	15319.1	8760.5	1.749	0.083271	
Signif, code s: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 ' ' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 12500 on 105 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.326, Adjusted R-squared: 0.2553					
F-statistic: 4.616 on 11 and 105 DF, p-value: 1.036e-05					

Tabla 26. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de K en la escorrentia con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques

Intercepto	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	45092	32667	1.38	0.1704	
FbloqueB	59566	25870	2.303	0.0233	**
FbloqueC	41728	25870	1.613	0.1097	
Ftto1500	39365	25870	1.522	0.1311	
Ftto3000	46768	25870	1.808	0.0735	
I15m	-34963	21617	-1.617	0.1088	
I30m	61162	33926	1.803	0.0743	
I60m	-36481	16710	-2.183	0.0312	**
I15p	117467	72127	1.629	0.1064	
I30p	-131973	99232	-1.33	0.1864	
I45p	-149900	96324	-1.556	0.1227	
I60p	189620	76115	2.491	0.0143	**

Signif, code s: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 108600 on 105 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.1985, Adjusted R-squared: 0.1145
 F-statistic: 2.364 on 11 and 105 DF, p-value: 0.01191

Tabla 27. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Na en la escorrentia con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques

Intercepto	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	2583.7	1267.2	2.039	0.043973	*
FbloqueB	2115.8	1003.5	2.108	0.037379	*
FbloqueC	-262.2	1003.5	-0.261	0.794355	
Ftto1500	225.2	1003.5	0.224	0.822887	
Ftto3000	-843.4	1003.5	-0.84	0.402554	
I15m	569.3	838.5	0.679	0.498688	
I30m	-681.1	1316	-0.518	0.605857	
I60m	-197.7	648.2	-0.305	0.760982	
I15p	4009.2	2797.9	1.433	0.154849	
I30p	4253.2	3849.4	1.105	0.271729	
I45p	9522.6	3736.6	2.548	0.012266	*
I60p	-11605.1	2952.6	-3.93	0.000152	***

Signif, code s: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 4212 on 105 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.5372, Adjusted R-squared: 0.4887
 F-statistic: 11.08 on 11 and 105 DF, p-value: 2.352e-13

Tabla 28. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Fe en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques

Intercepto	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.164	0.214	5.426	0.000	***
FbloqueB	-0.021	0.170	-0.122	0.903	
FbloqueC	0.292	0.170	1.719	0.089	,
Ftto1500	-0.109	0.170	-0.644	0.521	
Ftto3000	-0.091	0.170	-0.539	0.591	
I15m	0.644	0.142	4.541	0.000	***
I30m	-1.347	0.223	-6.046	0.000	***
I60m	0.664	0.110	6.050	0.000	***
I15p	0.288	0.474	0.608	0.545	
I30p	1.555	0.651	2.387	0.019	*
I45p	-0.331	0.632	-0.523	0.602	
I60p	-1.078	0.500	-2.157	0.033	*

Signif, code s: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1

Residual standard error: 0.7128 on 105 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.4828, Adjusted R-squared: 0.4286
 F-statistic: 8.909 on 11 and 105 DF, p-value: 5.092e-11

Tabla 29. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de B en la escorrentía con respecto a las intensidades de precipitación en un diseño de bloques

Intercepto	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	0.062	0.019	3.322	0.001	***
FbloqueB	0.012	0.015	0.796	0.428	
FbloqueC	-0.003	0.015	-0.177	0.860	,
Ftto1500	-0.020	0.015	-1.356	0.178	
Ftto3000	-0.003	0.015	-0.206	0.837	
I15m	0.001	0.012	0.115	0.908	***
I30m	0.009	0.019	0.484	0.629	***
I60m	-0.008	0.010	-0.839	0.404	***
I15p	0.036	0.041	0.872	0.385	
I30p	-0.060	0.057	-1.047	0.297	*
I45p	0.041	0.055	0.752	0.454	
I60p	-0.017	0.044	-0.392	0.696	*

Signif, code s: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1

Residual standResidual standard error: 0.0622 on 105 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.1672, Adjusted R-squared: 0.07991
 F-statistic: 1.916 on 11 and 105 DF, p-value: 0.04523

Tabla 30. Análisis del suelo iniciales (promedio de tres muestras) y del suelo erosionado

Muestra Suelo Promedio	pH	M.O. %	Al ppm	Ca	Mg	K	CICE	P	S	Fe	B
				Cmol(+)/kg suelo				mg/kg suelo			
Suelo Original	5.37	31.20	1.53	4.4	1.23	0.30	7.47	9.7	7.3	233.3	0.23
Suelo Erosionado	6.09	33.6		11.15	2.65	0.66	14.46	5.80	Nd	215.84	Nd
Diferencia %	113.5	107.7		253.4	214.9	217.1	193.6	(60.0)		(92.5)	

Tabla 31. Analisis del suelo perdido por erosion. Primer ciclo

Identificación	pH	M.O.	Ca	Mg	K	CICE	P	Fe	Mn	Cu	Zn
		%	Cmolc kg-1				Mg kg-1				
P1 20.03.07	6	37	11.9	3.3	0.47	15.67	6	322	102	2	19
P2 20.03.07	6.3	34	13.8	3.1	0.45	17.35	6	297	81	2	14
P3 20.03.07	6.1	31.1	11.5	2.6	0.31	14.41	4	295	45	2	9
P6 20.03.07	Nd	Nd	11.89	2.1	0.4	14.39	2	291	25	2	8
P7 20.03.07	5.9	Nd	8.9	1.9	0.37	11.17	2	313	30	1	7
P8 20.03.07	6	33.7	12.4	2.7	0.66	15.76	4	272	31	1	6
P9 20.03.07	6.2	35.7	11.1	2.1	0.43	13.63	4	255	30	1	5
P1 27.03.07	Nd	Nd	10.9	2.9	0.44	14.24	10	271	73	2	22
P9 27.03.07	Nd	Nd	9.9	1.7	0.4	12.00	12	95	15	1	5
P1 10.04.07	Nd	37.9	12.2	4.4	1.14	17.74	Nd	292	121	2	22
P3 10.04.07	Nd	33.2	13.1	2.7	0.35	16.15	Nd	241	90	1	15
P7 10.04.07	6.1	30	9.8	1.7	0.24	11.74	4	138	28	1	5
P8 10.04.07	6.1	36.5	12.7	2.5	0.73	15.93	7	105	30	1	6
P9 10.04.07	6.1	29.8	10.6	2	0.42	13.02	3	126	28	1	5
P7 24.04.07	Nd	30.5	7.8	1.7	0.34	9.84	7	116	46	1	6
P9 24.04.07	Nd	34.1	9.8	2.3	0.88	12.98	8	112	67	1	8
P7.24.05.07.	Nd	Nd	10.3	2.7	0.63	13.63	5	132	42	1	7
P8 24.05.07	Nd	Nd	12.3	3.8	1.5	17.60	9	236	59	1	7
P9 24.05.07	Nd	Nd	11.8	3.5	1.41	16.71	6	192	64	1	9
P7 29.05.07	Nd	Nd	10.3	2.3	0.54	13.14	4	0	100	18	1
P8 29.05.07	Nd	Nd	11.6	3.2	1.25	16.05	8	0	219	58	1
P9 29.05.07	Nd	Nd	10.7	3.1	1.13	14.93	5	0	172	48	1
Promedio		33.6	11.15	2.65	0.66	14.46	5.80	215.84	68.09	6.77	8.55

Nd: No determinado

Fórmula molecular: C₈ Cl₄ N₂ (2,4,5,6-tetrachloro-1,3-benzenodicarbonitrile)

Nomenclatura (IUPAC): Tetrachloroisoftalonitrilo.

Peso Molecular: 265.89 g/mol.

Toxicidad aguda oral en rata: Baja, LD50 = 5000 mg/kg

Degradación y Movilidad: Se espera que en el suelo el clorotalonil tenga una movilidad baja o nula y una vida media de 10-40 días en suelos aireados y de 5 a 15 días en suelos hidromórficos. En sistemas acuáticos puede unirse a sólidos suspendidos o sedimentos o puede ser eliminado por procesos químicos o biológicos. Su potencial de bioconcentración varía de bajo a alto en organismos acuáticos. Su persistencia es de 6 a 43 días.

Toxicidad en Peces y Aves: El clorotalonil es altamente tóxico para anfibios y moderadamente tóxico para insectos, pero prácticamente no es tóxico para aves. No es tóxico para las abejas.

2.5.3. Pesticidas en el agua de escorrentía

Las cantidades de pesticidas presentes en las aguas de escorrentía, para los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre de 2007, se encuentran en las tablas 32, 33, 33, 34 y 35. En las figuras 23 y 24 se encuentra un balance entre la cantidad aplicada y la evaluada en el agua de escorrentía. En general las pérdidas de pesticidas para el clorotalonil, son mayores que para la cipermetrina.

El clorotalonil se evaluó estadísticamente, tabla 36, contra las variables: Suelo erosionado, volumen de escorrentía, intensidad de la precipitación, ingrediente activo aplicado, días entre aplicación y evaluación del producto en la escorrentía (DAMCI), días entre mediciones o evaluaciones (DM) y sus interacciones, controlando la variabilidad debida a los bloques (pendiente del terreno,) sin embargo las variables que más explicaron la recuperación en el agua de escorrentía del clorotalonil, fueron las intensidades de precipitación I-15, I-30, promedia, precipitación acumulada (pacum), igualmente tiene un efecto significativo los días transcurridos entre aplicación y medición del clorotalonil (DAMCI) y los días entre mediciones (DM).

La cantidad de ingrediente activo aplicado no tuvo un efecto significativo en el modelo estadístico, lo cual sugiere que hay mayor significancia de la acumulación del ingrediente activo en el suelo, que se está reflejando en la cantidad de pesticida recuperado. Para la cipermetrina es válido lo anterior, pero igualmente I-45 tiene un efecto significativo y DM no tiene efecto significativo, tabla 37.

Parece que los pesticidas, se adsorben en los coloides del suelo (orgánico e inorgánico) y sufren desorción, este equilibrio se está investigando para el clorotalonil, mediante ensayos en columnas de suelo, cuyos resultados se anexarán posteriormente.

Tabla 32. Pesticidas determinados en las aguas de escorrentía en el mes de septiembre de 2007

Fecha Muestreo	Fecha Aplicación Cipermetrina	Fecha Aplicación Daconil	I. A. Aplicado Cipermetrina/ha	I. A. Aplicado Clorotalonil/ha	I.A. Cipermetrina en escorrentías mg/ha	Clorotalonil en escorrentía mg/ha
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	2.51	0.18
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	2.79	0.20
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	1.89	0.13
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	0.19	0.01
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	0.10	0.01
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	2.73	0.19
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	0.63	0.04
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	0.31	0.02
21-Sep-07	18-Sep-07	18-Sep-07	112.613	324.324	2.96	0.21
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	3.86	15.91
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	8.05	1.21
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	7.75	11.22
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	0.91	0.22
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	0.12	0.03
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	2.17	3.68
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	0.12	0.03
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	0.41	0.58
28-Sep-07	25-Sep-07	25-Sep-07	127.628	459.459	0.38	0.33

Tabla 33. Pesticidas determinados en las aguas de escorrentía en el mes de Octubre de 2007

Fecha Muestreo	Fecha Aplicación Cipermetrina	Fecha Aplicación Daconil	I. A. Aplicado Cipermetrina/ha	I. A. Aplicado Clorotalonil/ha	I.A. Cipermetrina en escorrentía mg/ha	Clorotalonil en escorrentía mg/ha
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	6.05	1.45
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	8.19	1.96
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	7.44	1.78
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	7.44	1.78
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	3.40	0.81
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	7.81	1.87
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	0.76	0.18
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	2.05	0.49
2-Oct-07	25-Sep-07	25-Sep-07	142.643	459.459	1.64	0.39
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	7.10	658.39
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	10.23	201.21

Continuación Tabla 33

Fecha Muestreo	Fecha Aplicación Cipermetrina	Fecha Aplicación Daconil	I. A. Aplicado Cipermetrina/ha	I. A. Aplicado Clorotalonil/ha	I.A. Cipermetrina en escorrentía mg/ha	Clorotalonil en escorrentía mg/ha
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	8.33	21.74
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	8.21	60.66
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	7.20	1.72
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	7.83	32.34
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	7.59	87.92
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	9.77	217.17
5-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	10.70	54.29
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.33	5.10
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	20.67	4.94
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	25.39	6.07
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.17	5.06
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	10.84	2.59
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	20.16	4.82
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	13.23	3.16
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.30	5.09
9-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.42	5.12
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.05	5.03
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.87	5.23
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	23.95	5.73
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	20.79	4.97
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	17.77	4.25
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.05	5.03
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.17	5.06
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	19.79	4.73
11-Oct-07	3-Oct-07	3-Oct-07	No se Aplico	513.514	21.93	5.24
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	0.19	3.99
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	0.47	9.94
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	1.13	271.23
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	0.27	48.79
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	0.07	0.02
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	0.34	0.81
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	0.02	0.00
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	0.28	0.07
12-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	0.52	25.96
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	18.40	2880.00
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	22.18	5786.30
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	19.16	17.49
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	17.64	80.55
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	6.55	1.57
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	18.53	6.44
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	8.07	9.82

Continuación Tabla 33

Fecha Muestreo	Fecha Aplicación Cipermetrina	Fecha Aplicación Daconil	I. A. Aplicado Cipermetrina/ha	I. A. Aplicado Clorotalonil/ha	I.A. Cipermetrina en escorrentía mg/ha	Clorotalonil en escorrentía mg/ha
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	18.53	6.44
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	8.07	9.82
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	13.99	23.72
16-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	14.37	243.62
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	15.38	190.52
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	21.14	39.98
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	19.46	4.65
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	18.35	23.13
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	11.41	2.73
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	7.18	1.72
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	7.31	1.75
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	10.21	7.99
18-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	12.98	5.36
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	21.42	5.12
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	21.05	5.03
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	22.81	5.45
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	20.67	4.94
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	16.51	3.95
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	13.86	3.32
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	18.40	4.40
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	20.67	4.94
22-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	15.38	3.68
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	5.10
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	5.21
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	5.64
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	5.15
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	5.37
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	5.57
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	4.93
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	5.10
25-Oct-07	No se Aplico	11-Oct-07	No se Aplico	837.838	No Analizado	5.42

Tabla 34. Pesticidas determinados en las aguas de escorrentía en el mes de Noviembre de 2007

Fecha Muestreo	Fecha Aplicación Cipermetrina	Fecha Aplicación Daconil	I. A. Aplicado Cipermetrina/ha	I. A. Aplicado Clorotalonil/ha	I.A. Cipermetrina en escorrentía mg/ha	Clorotalonil en escorrentía mg/ha
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	131.51
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	252.74
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	166.85
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	78.63
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	1.04
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	87.40
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	19.18
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	345.21
2-Nov-07	No se Aplico	30-Oct-07	No se Aplico	810.811	No Analizado	2104.11
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	40185.70
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	24503.81
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	61929.23
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	70121.65
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	32822.77
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	108737.66
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	40340.44
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	70216.58
20-Nov-07	No se Aplico	14-Nov-07	No se Aplico	472.973	No Analizado	51637.19

Tabla 35. Pesticidas determinados en las aguas de escorrentía en el mes de Diciembre de 2007

Fecha Muestreo	Fecha Aplicación Cipermetrina	Fecha Aplicación Daconil	I. A. Aplicado Cipermetrina/ha	I. A. Aplicado Clorotalonil/ha	I.A. Cipermetrina en escorrentía mg/ha	Clorotalonil en escorrentía mg/ha
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	1363.40
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	4.38
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	162.56
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	3.30
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	1.72
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	129.29
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	31.69
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	5.10
4-Dic-07	No se Aplico	1-Dic-07	No se Aplico	323.649	No Analizado	2.87
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	1163.01
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	47.03
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	1299.59
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	5.10
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	5.21

Continuación Tabla 35

Fecha Muestreo	Fecha Aplicación Cipermetrina	Fecha Aplicación Daconil	I. A. Aplicado Cipermetrina/ha	I. A. Aplicado Clorotalonil/ha	I.A. Cipermetrina en escorrentía mg/ha	Clorotalonil en escorrentía mg/ha
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	3913.98
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	5468.27
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	5.15
11-Dic-07	No se Aplico	3-Dic-07	No se Aplico	594.595	No Analizado	1732.94
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	37712.90
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	13931.30
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	35174.67
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	1730.11
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	313.89
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	71932.93
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	51675.06
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	6148.99
14-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	41356.37
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic -07	No se Aplico	540.541	No Analizado	40.89
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	38.19
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	189.85
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	5.10
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	1.40
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	39.61
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	19.76
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	22.76
18-Dic-07	No se Aplico	11-Dic-07	No se Aplico	540.541	No Analizado	31.91

Tabla No 36. Coeficientes del modelo lineal de concentración de Clorotalonil (ppm de I.A.) en las aguas de escorrentía, con respecto a las intensidades de precipitación en un modelo de bloques.

Coefficiente	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	736.773	50.192	14.679	< 2e-16	***
fBloqB	10.408	30.340	0.343	0.732590	
fBloqC	21.062	31.764	0.663	0.509449	
DM	-13.975	2.540	-5.502	5.78e-07	***
DAMCI	12.341	4.600	2.683	0.009100	**
pacum	-3.439	0.562	-6.119	4.83e-08	***
I15p	-17.930	3.464	-5.176	2.07e-06	***
I30p	-178.030	51.287	-3.471	0.000892	***
I45p	83.229	77.764	1.070	0.288172	

Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 108.3 on 70 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.7902, Adjusted R-squared: 0.7632

F-statistic: 29.29 on 9 and 70 DF, p-value: < 2.2e-16

Tabla No 37. Coeficientes del modelo lineal de la concentración de Cipermetrina (ppm de I.A.) en las aguas de escorrentía, con respecto a las intensidades de precipitación en un modelo de bloques.

Coefficiente	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	148.91896	0.91292	163.124	< 2e-16	***
fBloqB	0.02773	0.94223	0.029	0.977	
fBloqC	-0.23207	1.04614	-0.222	0.826	
DAMC	-11.27529	0.08090	-139.365	< 2e-16	***
I15p	-1.24455	0.09845	-12.641	3.472e-15	***
I30p	-37.02362	1.70993	-21.652	< 2e-16	***
I45p	39.08916	1.47786	26.450	< 2e-16	***

Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 2.453 on 38 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9985, Adjusted R-squared: 0.9083

F-statistic: 4339 on 6 and 38 DF, p-value: < 2.2e-16

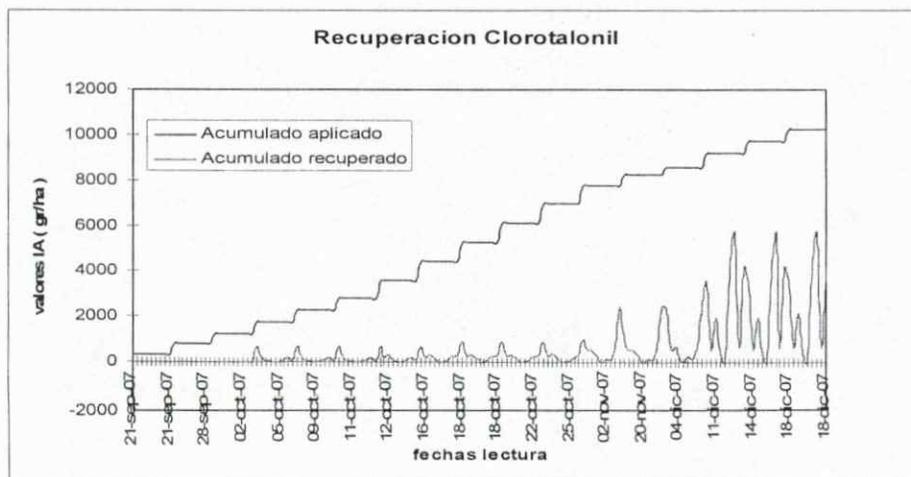


Figura N° 23. Balance de clorotalonil: Acumulado aplicado vs. Acumulado recuperado en las aguas de escorrentía

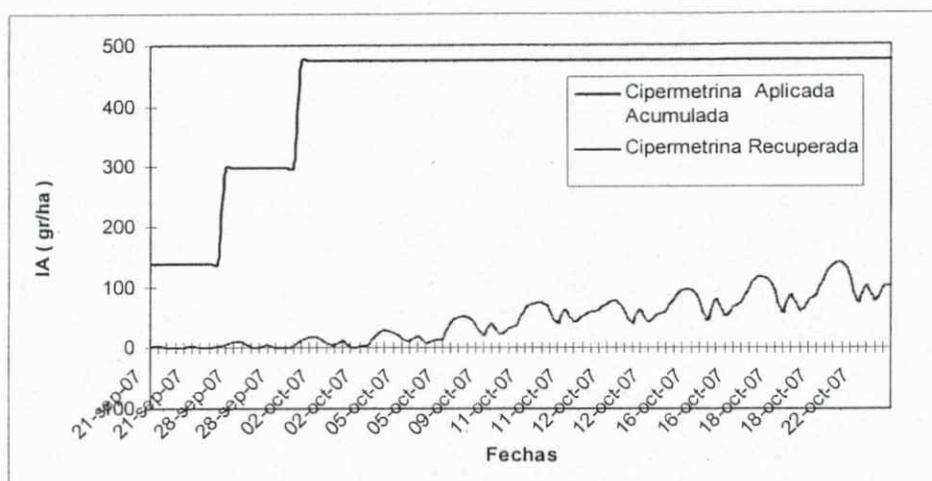


Figura 24. Balance de cipermetrina: Acumulado aplicado vs. Acumulado recuperado en las aguas de escorrentía

2.6. Análisis de crecimiento y dinámica de absorción de nutrientes en la papa (*solanum tuberosum* l.) var. Diacol Capiro.

La formulación de un modelo de crecimiento, conocido como análisis funcional del crecimiento, comprende medidas a intervalos de tiempo mas frecuentes, usando un número pequeño de plantas. Para ello es necesario realizar un análisis de crecimiento a través de su fisiología, desarrollo y producción de materia seca en las plantas; este modelo permite optimizar y tecnificar los procesos productivos en el cultivo de papa.

El crecimiento de las plantas se define como el proceso de división y elongación celular que conlleva al crecimiento irreversible de la materia seca. Es un evento fisiológico, que involucra el incremento de ciertos parámetros característicos en el tiempo: Tamaño, el peso, altura y el área de un órgano o conjunto de órganos vegetales. Gutiérrez, (2005).

Se realizó un análisis de la distribución de iones en la planta, con el fin de determinar los momentos precisos en los cuales ésta requiere determinados nutrientes, dependiendo del estado de desarrollo en el que se encuentre. Esto conduce a establecer un proceso de fertilización óptimo tanto en: El *tiempo exacto* que la planta lo requiera como en los *costos de producción*, como en su *menor impacto ambiental*, evitando desequilibrios ecológicos, ocasionados por la contaminación que genera la erosión química.

2.6.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva planteada a continuación, determina algunos parámetros básicos con referencia al análisis de la producción y distribución de masa seca. Estos estadísticos se obtienen a partir de los contenidos iónicos y de biomasa, producto de los análisis de las ocho destrucciones realizadas durante el desarrollo fenológico, en el primer ciclo del

cultivo, con tres niveles de fertilización (500-1500 y 3000 kg/ha de un fertilizante de grado 10-20-20).

Entre los parámetros a considerar se encuentran los puntos máximos y mínimos de acumulación de masa seca, la mediana, la media y el rango. Además la varianza y el coeficiente de variación, estos últimos evidencian la dispersión u homogeneidad de los datos.

Los estadísticos evaluados para el crecimiento de cada órgano con el tratamiento de 500 kg de fertilizante 10-20-20/ha, evidencian el crecimiento exponencial del cultivo, notorio en sus valores máximos y mínimos en cada una de las destrucciones, tabla 38.

La materia seca evaluada en hojas con el tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20, presentó un incremento hasta la semana doce de manera exponencial, de la cual se obtuvo puntos de máxima y mínima producción de biomasa seca en la planta.

El contenido mínimo de materia seca se obtuvo en la quinta semana de desarrollo del cultivo (3,51g), primera destrucción realizada. El contenido máximo obtenido en la acumulación de materia seca en hojas, 64,31g, se alcanzó en la semana doce del cultivo, destrucción siete.

Los valores mínimos de producción de materia seca registrados para el factor hojas, evidenciaron una fuerte disminución en la producción de biomasa seca (9,46 g) en la octava destrucción (semana 14), con respecto a la biomasa obtenida en las semanas 9, 10 y 12; lo cual implica un marcado efecto del estado de senescencia del cultivo, coincidente con el punto óptimo de la madurez fisiológica del mismo y una translocación fuerte hacia los tubérculos.

El valor más bajo obtenido en los puntos de máxima producción de materia seca, fue observado en la quinta semana de desarrollo de las plantas de papa (13,91 g), es decir, en la primera medición destructiva realizada. En los valores mínimos obtenidos, el crecimiento exponencial es continuo hasta comenzar la etapa de senescencia de las plantas.

En el caso de los puntos máximos alcanzados, aunque los valores inicialmente se comportan de forma exponencial, en la semana 8 y 10 se presenta una disminución en la producción de materia seca, lo cual puede atribuirse a la aleatoriedad de cada muestreo, puesto que las plantas no eran totalmente homogéneas, sin importar que fueran sembradas el mismo día y bajo las mismas condiciones controladas, tabla 38.

El efecto es similar para tallos y raíces, con valores máximos de 73,77g y 24,97g respectivamente; y con valores mínimos de 1,97g y 1,41g, durante las etapas de desarrollo del cultivo y en general para las ocho destrucciones realizadas; por lo tanto son obvios los resultados iniciales en la producción de masa seca del cultivo, puesto que las plantas eran mucho más pequeñas que al finalizar las etapas de desarrollo del mismo; en estas últimas

etapas se observó mayor desarrollo y producción de biomasa seca, hasta llegar el estado de senescencia del cultivo en la semana 14.

La producción de masa seca en tubérculos es nula en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, hasta llegar a la sexta y séptima semana, el inicio de la tuberización, donde se observan los primeros registros de producción de biomasa seca, un valor mínimo de 1,56 g.

De igual forma el crecimiento de los tubérculos es de forma exponencial, por lo cual su máxima acumulación de biomasa se observa en la última semana de evaluación 234,32 g (semana 12), punto en el cual ha iniciado la traslocación de gran parte de sus nutrientes para realizar el llenado de los tubérculos y otra parte para respirar, tabla 38.

En la distribución de masa seca total, se observa de igual forma un incremento exponencial en la producción de biomasa en la planta con un punto mínimo de 7,86 g, en general para todas las parcelas y con un máximo de 376,37 g, ambos crecientes hasta la semana 12 y en la semana 14 se da la disminución de biomasa tras el avance del proceso de senescencia del cultivo, tabla 38.

Para el tratamiento de 1500 kg de fertilizante 10-20-20/ha, se presentó una situación similar, con relación al crecimiento evidenciado en las plantas con el tratamiento de 500 kg de fertilizante 10-20-20/ha.

Como no se observa una tendencia a la disminución de la producción de materia seca, en la medida en que el cultivo se acerca de las semanas 12 y 14 de evaluación (destrucciones 7 y 8), como sucedió con el anterior tratamiento, tabla 39, se considera que el crecimiento es exponencial para cada uno de los órganos, con una diferencia importante en los valores máximos obtenidos,

Esta situación implica que las plantas prolonguen su ciclo de vida en la medida en que se encuentre mayor disponibilidad de nutrientes y puedan absorber más, de igual forma serán mucho más vigorosas, lo cual se refleja de forma directa en su producción de materia seca total y por órgano. Los valores máximos registrados para hojas, tallos, raíces, tubérculos y biomasa total, fueron: 69,81 g, 117,59g, 29,67 g, 205,67 g, 217,07 g respectivamente, tabla 39.

El tratamiento de 3000 kg de fertilizante 10-20-20/ha, disminuyó considerablemente la producción de masa seca, con relación al tratamiento de 1500 kg de fertilizante 10-20-20/ha; aunque la producción de masa seca para tubérculos fue la más alta de los tres tratamientos, la biomasa disminuyó considerablemente, lo cual se hace evidente en los valores máximos obtenidos, tabla 40.

Los puntos de mayor acumulación de biomasa seca en las ocho destrucciones, coinciden con las semanas nueve y diez, en donde se da la etapa de floración. En este momento se espera que la acumulación de biomasa sea la máxima debido a que este es un punto crítico del cultivo, donde los nutrientes son traslocados hacia los tubérculos en desarrollo.

Tabla.38. Estadísticos descriptivos para las variables de crecimiento (g) en el tratamiento 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20

Variable	Medición	min	max	range	median	mean	var	std.dev	coef.var
Peso seco hojas	1	3,51	13,91	10,40	5,61	6,81	13,75	3,71	0,54
	2	3,39	19,02	15,63	12,76	12,73	30,41	5,51	0,43
	3	18,95	46,82	27,87	30,61	31,57	99,12	9,96	0,32
	4	15,31	30,00	14,69	17,01	19,27	31,32	5,60	0,29
	5	26,73	58,83	32,10	33,86	40,06	187,71	13,70	0,34
	6	32,75	57,84	25,09	39,46	41,72	82,53	9,08	0,22
	7	37,59	64,31	26,72	49,95	50,36	174,27	13,20	0,26
	8	9,46	44,75	35,29	25,89	25,72	139,80	11,82	0,46
Peso seco tallos	1	1,97	6,31	4,34	3,13	3,51	2,36	1,54	0,44
	2	2,96	15,40	12,44	9,10	9,85	20,51	4,53	0,46
	3	16,50	32,34	15,84	24,94	24,49	50,68	7,12	0,29
	4	23,47	35,35	11,88	26,62	27,67	17,82	4,22	0,15
	5	24,66	57,74	33,08	30,36	37,18	185,88	13,63	0,37
	6	33,84	61,00	27,16	45,75	47,03	97,03	9,85	0,21
	7	15,67	73,77	58,10	51,66	46,39	441,91	21,02	0,45
	8	12,16	47,29	35,13	28,63	30,51	143,82	11,99	0,39
Peso seco raíz	1	1,41	3,67	2,26	2,10	2,29	0,81	0,90	0,39
	2	2,08	8,08	6,00	5,35	5,10	4,08	2,02	0,40
	3	8,99	16,32	7,33	12,69	12,66	6,72	2,59	0,20
	4	9,68	13,88	4,20	12,30	11,86	3,25	1,80	0,15
	5	10,63	21,62	10,99	13,46	14,63	18,81	4,34	0,30
	6	16,48	24,97	8,49	17,88	18,90	10,59	3,25	0,17
	7	5,58	15,39	9,81	11,71	11,22	15,89	3,99	0,36
	8	3,59	14,58	10,99	7,65	8,15	17,59	4,19	0,51
Peso seco tubérculo	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	1,86	1,86	0,49	0,80	0,74	0,86	1,08
	3	1,56	21,95	20,39	3,78	6,58	60,34	7,77	1,18
	4	6,45	36,78	30,33	23,07	21,26	131,25	11,46	0,54
	5	20,92	78,50	57,58	36,78	41,71	402,92	20,07	0,48
	6	33,85	91,25	57,40	59,92	59,15	471,38	21,71	0,37
	7	91,73	234,32	142,59	159,33	166,46	3243,24	56,95	0,34
Masa total	1	7,86	23,89	16,03	10,69	12,61	36,36	6,03	0,48
	2	8,52	44,36	35,84	27,92	28,47	149,42	12,22	0,43
	3	51,27	117,43	66,16	70,83	75,29	594,53	24,38	0,32
	4	56,88	113,64	56,76	77,68	80,06	376,43	19,40	0,24
	5	91,68	209,83	118,15	119,80	133,57	2210,94	47,02	0,35
	6	22,34	214,70	192,36	165,45	166,80	1456,62	38,17	0,23
	7	88,66	376,37	287,71	259,83	274,42	7706,48	87,79	0,32
	8	25,21	16,62	81,41	61,30	64,37	697,40	26,41	0,41

Las plantas evaluadas con el tratamiento, 3000kg/ha, eran muy vigorosas; por lo que se vieron más susceptibles al daño producido por el ataque de *Phytophthora infestans*, y volcamiento por efecto del viento, por lo cual su producción de materia seca es directamente afectada. Los valores máximos obtenidos para este tratamiento fueron: 78,68 g en hojas, 95,84 g en tallos, 34,19 g en raíces, 159,30 g en tubérculos y 313,99 g en biomasa total.

2.6.2. Distribución de la masa seca a través del tiempo, según el tratamiento de fertilización

Se elaboró un modelo para la producción de materia seca y la distribución de asimilados en los diferentes órganos de la planta (*Solanum tuberosum* L. var. Diacol Capiro), a través del tiempo, con tres niveles de fertilizante 10-20-20/ha.

Para alcanzar el modelo que mejor se ajustara a las condiciones de campo, fue necesario: *Obtener* la información del crecimiento funcional o la producción de materia seca, *esclarecer* todas las posibles interacciones existentes entre el factor tiempo y los tratamientos (niveles de fertilización), ajustados al tiempo lineal, cuadrático y cúbico, (s_1 , s_2 y s_3), *ajustar* regresiones polinómicas sobre la variable producción de materia seca total (biomasa) y por cada uno de los órganos (hojas, tallos, raíces y tubérculos), en los tres niveles de fertilizante 10-20-20/ha.

La selección de la regresión se hizo con base en los parámetros estadísticos del coeficiente de determinación (R^2), con los estimados del modelo y el análisis de los residuales. El modelo estudiado puede ser usado en la predicción del crecimiento de cultivos bajo condiciones similares; para obtener de forma menos empírica y más tecnicada, los niveles óptimos de fertilización, acordes con los requerimientos del cultivo, acompañado de las principales variables que intervienen en su crecimiento, desarrollo y producción.

Tabla 39. Estadísticos descriptivos para las variables de crecimiento (g) en el tratamiento 1500 kg/ha de fertilizante 10- 20-20

Variable	Medicion	min	max	range	median	mean	var	Std.dev	Coef.var
Peso seco hojas	1	2,99	13,42	10,43	6,65	7,66	18,99	4,36	0,57
	2	1,76	22,96	21,20	10,35	11,28	59,79	7,73	0,69
	3	22,76	49,34	26,58	27,28	30,64	104,87	10,24	0,33
	4	15,31	42,80	27,49	26,07	27,39	90,04	9,49	0,35
	5	27,51	78,21	50,70	42,88	45,28	314,00	17,72	0,39
	6	20,05	68,90	48,85	49,43	47,89	337,85	18,38	0,38
	7	20,86	58,95	38,09	31,53	34,78	203,69	14,27	0,41
	8	10,27	69,81	59,54	23,49	30,31	463,16	21,52	0,71
Peso seco tallos	1	1,80	7,09	5,29	4,00	4,15	4,18	2,04	0,49
	2	1,32	16,53	15,21	8,09	8,49	32,25	5,68	0,67
	3	19,34	47,54	28,20	26,47	28,87	109,35	10,46	0,36
	4	25,56	53,07	27,51	36,95	38,18	105,44	10,27	0,27
	5	28,19	75,95	47,76	43,28	46,07	262,57	16,20	0,35
	6	21,50	80,30	58,80	60,03	56,56	501,56	22,40	0,40
	7	20,80	84,80	64,00	43,29	45,95	707,27	26,59	0,58
	8	10,46	117,59	107,13	45,25	49,91	1286,69	35,87	0,72
Peso seco raiz	1	1,61	3,88	2,27	3,34	3,02	0,77	0,88	0,29
	2	1,50	8,64	7,14	4,73	4,68	6,45	2,54	0,54
	3	10,58	14,39	3,81	12,48	12,32	2,26	1,50	0,12
	4	12,53	21,89	9,36	15,60	16,23	11,98	3,46	0,21
	5	11,01	26,82	15,81	14,15	15,39	34,40	5,87	0,38
	6	16,44	26,67	10,23	23,72	22,33	16,87	4,11	0,18
	7	4,01	12,33	8,32	10,04	9,21	11,05	3,32	0,36
	8	5,52	29,67	24,15	10,96	12,83	78,48	8,86	0,69
Peso seco tuberculos	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	2,26	2,26	0,01	0,46	0,81	0,90	1,97
	3	1,18	14,64	13,46	4,41	6,04	23,01	4,80	0,79
	4	12,62	38,71	26,09	22,99	23,98	116,23	10,78	0,45
	5	9,30	85,32	76,02	51,34	49,07	1240,64	35,22	0,72
	6	22,00	130,82	108,82	59,13	66,81	1451,64	38,10	0,57
	7	27,54	205,67	178,13	147,25	124,88	4835,63	69,54	0,56
Masa total	1	6,78	24,39	17,61	14,13	14,82	50,34	7,10	0,48
	2	4,58	48,13	43,55	24,30	24,91	258,19	16,07	0,65
	3	57,36	114,85	57,50	74,68	77,87	438,65	20,94	0,27
	4	66,02	147,97	81,95	100,75	105,78	879,61	29,66	0,28
	5	81,69	263,14	181,45	151,63	155,81	4848,74	69,63	0,45
	6	79,99	300,21	220,22	207,58	193,59	5587,65	74,75	0,39
	7	73,21	325,00	251,79	228,82	214,81	11266,28	106,14	0,49
	8	33,86	217,07	183,21	82,80	93,05	4180,72	64,66	0,69

Tabla 40. Estadísticos descriptivos para las variables de crecimiento (g) en el tratamiento 3000 kg/ha de fertilizante 10- 20-20

Variable	Medicion	min	max	range	median	mean	var	Std.dev	Coef.var
Peso seco hojas	1	2,95	8,35	5,40	5,31	5,36	3,76	1,94	0,36
	2	4,66	17,29	12,63	13,03	12,28	25,34	5,03	0,41
	3	21,25	40,89	19,64	34,62	33,15	47,56	6,90	0,21
	4	15,07	46,32	31,25	35,07	32,26	120,74	10,99	0,34
	5	39,26	66,58	27,32	51,27	51,49	85,05	9,22	0,18
	6	27,17	78,68	51,51	53,07	53,30	386,14	19,65	0,37
	7	15,74	23,05	7,31	20,86	20,42	6,82	2,61	0,13
	8	5,90	34,00	28,10	11,39	17,01	144,94	12,04	0,71
Peso seco tallos	1	1,81	4,55	2,74	3,13	3,12	0,96	0,98	0,32
	2	3,86	14,98	11,12	9,56	9,61	15,50	3,94	0,41
	3	23,30	36,08	12,78	27,71	29,01	29,69	5,45	0,19
	4	23,61	59,92	36,31	48,88	44,89	157,05	12,53	0,28
	5	42,89	71,86	28,97	51,11	55,24	136,93	11,70	0,21
	6	34,68	95,84	61,16	62,89	64,49	437,16	20,91	0,32
	7	24,17	73,52	49,35	32,93	38,09	328,46	18,12	0,48
	8	9,48	71,98	62,50	34,89	40,15	516,60	22,73	0,57
Peso seco raiz	1	1,56	3,77	2,21	1,87	2,19	0,84	0,91	0,42
	2	2,81	5,38	2,57	4,81	4,32	1,13	1,07	0,25
	3	10,66	17,49	6,83	13,90	14,21	6,88	2,62	0,18
	4	12,22	22,38	10,16	18,82	18,43	13,27	3,64	0,20
	5	14,76	24,03	9,27	17,41	18,22	12,76	3,57	0,20
	6	15,48	34,19	18,71	22,99	24,89	59,77	7,73	0,31
	7	8,78	22,96	14,18	10,65	13,06	30,72	5,54	0,42
	8	3,53	20,54	17,01	8,13	9,70	33,82	5,82	0,60
Peso seco tubérculos	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,02	0,40	0,39	0,05	0,11	0,02	0,15	1,41
	3	0,37	3,72	3,35	2,04	2,04	2,15	1,47	0,72
	4	6,28	31,41	25,13	14,55	16,28	91,14	9,55	0,59
	5	10,14	47,34	37,20	17,25	22,89	214,58	14,65	0,64
	6	23,45	105,28	81,83	55,61	58,23	1033,86	32,15	0,55
	7	79,63	159,30	79,67	92,86	105,04	952,64	30,86	0,29
Masa total	1	6,36	14,46	8,10	10,28	10,66	9,05	3,01	0,28
	2	11,35	37,34	26,00	26,93	26,31	97,84	9,89	0,38
	3	55,58	95,41	39,82	81,07	78,42	204,83	14,31	0,18
	4	61,39	149,72	88,33	119,07	111,84	1085,63	32,95	0,29
	5	113,03	191,80	78,77	134,86	147,85	1226,54	35,02	0,24
	6	100,78	313,99	213,21	205,56	200,91	5610,37	74,90	0,37
	7	134,31	224,69	90,38	174,34	176,61	921,37	30,35	0,17
	8	24,40	126,52	102,12	51,55	66,85	1467,54	38,31	0,57

2.6.2.1. Masa seca de hojas

La distribución de biomasa seca en hojas, tiene un incremento significativo a partir de la quinta semana después de siembra; tiempo en el cual se realizó el aporque de las plantas de papa. La distribución muestra una tendencia al incremento hasta la semana diez donde se observa el punto de máxima acumulación de biomasa en hojas, el cual coincide con la etapa de floración e inicio de tuberización. A partir del inicio de floración se nota un receso en la acumulación de biomasa seca en las hojas; lo cual es de esperarse, puesto que al iniciarse la tuberización (posterior a floración), la planta deja de consumir asimilados para el crecimiento vegetativo e invierte todos aquellos que tiene disponibles en las hojas, para trasladarlos hacia los tubérculos. En el tratamiento de 3000 kg/ha de fertilizante, se observa una caída mas abrupta en la masa seca de hojas, atribuible a la mayor propensión al ataque de “gotera” o tizón tardío”, producida por *Phytophthora infestans*, el cual generó pérdida de área foliar, en esta semana de desarrollo del cultivo, figura 25.

De acuerdo con Grandet y Lora, (1978), la mayor demanda de nutrimentos del cultivo de papa se presenta a partir de los 50 días de emergencia de las plantas, debido a una mayor intensidad de crecimiento.

2.6.2.1.1. Análisis de varianza para la variable respuesta hoja

El análisis de varianza para producción de masa seca en hojas es estadísticamente significativo para el tiempo lineal ($s = 1,6 \times 10^{-11}$) y el tiempo cuadrático ($s^2 < 2,2 \times 10^{-16}$), tabla 41, lo cual será de gran utilidad para determinar el modelo lineal que mejor ajuste la distribución de la masa seca en las hojas, durante todo el desarrollo vegetativo de la planta. Esto quiere decir que, la acumulación de biomasa a nivel foliar depende básicamente del tiempo, es función de este, por lo tanto es significativo en s y s^2 .

Los tiempos s y s^2 hacen alusión a regresiones polinómicas, que no definen el comportamiento biológico del cultivo como tal, sino que modelan la acción de cada uno de los factores determinantes en el modelo (el tiempo, la fertilización y la parcela), evaluados bajo condiciones específicas de campo (pendiente del terreno, humedad, temperatura, etc.). Por tal motivo en este caso específico tanto el tiempo lineal, como el cuadrático, fueron concluyentes para definir la distribución de biomasa seca en las hojas, durante el primer ciclo del cultivo.

2.6.2.1.2. Parámetros del modelo estadístico para la variable respuesta hoja

Al interior de los parámetros del modelo, se reitera la significancia estadística del factor tiempo lineal y cuadrático, con el cual se puede determinar un modelo lineal ajustado al 62%, tabla 42. De acuerdo con los estimados obtenidos para los tratamientos y las parcelas, no existen valores beta significativos para la estimación del modelo; con excepción de la parcela ocho, la cual es estadísticamente significativa, con un beta igual -0,1; valor que no fue tenido en cuenta, puesto que se consideró como parte del error experimental.

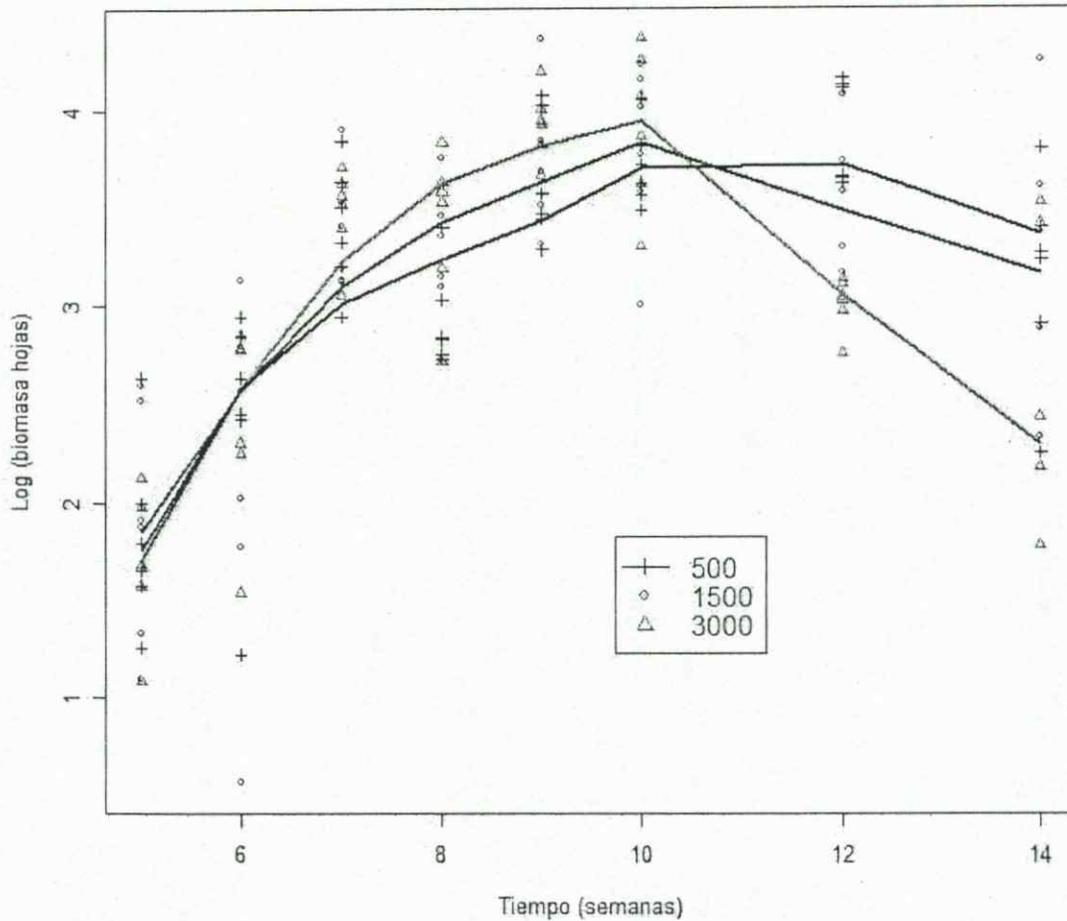


Figura 25. Acumulación de masa seca en hojas de (*Solanum tuberosum* L.) Var. DIACOL Capiro con tres niveles (500, 1500 y 3000 kg/ha) de un fertilizante grado 10-20-20

Tabla 41. Análisis de varianza para la variable respuesta hoja

Fuente de Var	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Tto	1	101	101	0,42	0,52	
par_F	7	2669	381	1,02	0,15	
S	1	18015	18015	74,56	0,00	***
s ²	1	40076	40076	165,86	< 2,2e-16	***
Residuals	133	32137	242			

Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, residuals: residuales.

Los valores betas deben ser entendidos como los coeficientes que acompañan a cada factor que conforma el modelo. Estos cambian de acuerdo con las variaciones que se le implementan al modelo a nivel de campo; es decir, los parámetros determinantes del modelo no deben cambiar, que en este caso se refieren al tratamiento de fertilización, a la parcela y al tiempo. Pero las condiciones específicas de campo pueden variar levemente (pendiente del terreno, humedad, temperatura, etc.); de manera tal que los betas o coeficientes del modelo cambien, lo cual no se traduce en una variación del modelo, ni en su ajuste.

Tabla 42. Parámetros del modelo estadístico cuadrático para la variable respuesta hoja.

Coefficientes	Estimate	Std.Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-3,48	0,47	-7,46	0,00	***
tto F1500	-0,01	0,10	-50,00	961,00	
tto F3000	-0,06	0,10	-607,00	545,00	
par F2	0,03	0,17	0,18	0,86	
par F3	0,13	0,17	0,75	0,46	
par F4	-0,05	0,17	-0,27	0,79	
par F5	-0,09	0,17	-0,49	0,63	
par F6	-0,04	0,17	-0,23	0,82	
par F7	-0,27	0,17	-1,54	0,13	
par F8	-0,35	0,17	-2,00	0,05	*
par F9	-0,11	0,17	-0,62	0,54	
s	1,42	0,10	13,97	< 2e-16	***
s ²	-0,07	0,01	-12,88	< 2e-16	***
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0.4916 on 133 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.6544, Adjusted R-squared: 0.6285					
F-statistic: 25.19 on 10 and 133 DF, p-value: < 2.2e-16					

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, R-squared: R_ajustado

2.6.2.2. Masa seca de tallos

En la producción de masa seca en tallos, no se observó un cambio significativo en el comportamiento de las curvas, bajo los tres niveles de fertilización con respecto a la producción en hojas. Después de la quinta semana, en la cual se llevó a cabo las practicas de aporque, se observó un incremento similar de la biomasa de los tallos en los tres tratamientos de fertilización, situación que se prolonga hasta la semana siete del desarrollo del cultivo. A partir de ésta semana, se observan diferencias en la producción de masa seca de acuerdo con los niveles de fertilización, es decir, que la producción de biomasa en la planta aumenta, en la medida que incrementa los niveles de fertilización en el cultivo, siendo mayor en 3000 kg /ha, seguido de 1500 kg/ha y finalmente en 500 kg de fertilizante 10-20-20/ha. En el desarrollo del cultivo la enfermedad conocida como "gotera" o tizón

tardío”, afectó hojas pero no los tallos, por lo cual no se encuentra la caída en la biomasa de hojas.

Aunque tales diferencias no son estadísticamente significativas, son útiles para la interpretación del comportamiento de la planta en su estado de desarrollo. En este caso específico, se infiere que en la medida en que la planta posee mayores fuentes de nutrientes, estos son consumidos, así los niveles de producción no cambian de forma considerable de un tratamiento a otro.

Los puntos de máxima acumulación de biomasa, coinciden con las semanas ocho y nueve, en plena etapa de floración, extendiéndose hasta la semana 10, a partir de la cual la producción es de forma descendente, siendo más evidente para el tratamiento de 3000 kg de fertilizante 10-20-20/ha; hasta llegar al punto de hacerse constante en la última semana de evaluación (semana 14, 98 días después de la siembra), donde la producción de masa seca aérea disminuye y aumenta la producción de biomasa en tubérculos, figura 26.

2.6.2.2.1. Análisis de varianza para la variable respuesta tallo

A partir del análisis de varianza, se puede inferir un alto grado de significancia para el establecimiento del modelo, en el factor tiempo lineal y cuadrático, con valores de $s = 1.6 \cdot 10^{-11}$ y $s^2 < 2.2 \cdot 10^{-16}$; sin tener una influencia directa de los factores: Tratamiento y parcela, tabla 43.

2.6.2.2.2. Parámetros del modelo estadístico para la variable respuesta tallo

En la evaluación de los parámetros que determinan el modelo, se reitera el efecto del factor tiempo lineal y cuadrático con betas de: 4.23 y -0.36 respectivamente, siendo mucho más significativo el segundo. De igual forma se observa que el intercepto tiene un beta de -12.1 y logra un ajuste para el modelo del 80.37%.

Se observó también, un efecto en las parcelas 7 y 8, el cual se puede atribuir a error experimental, tabla 44. Este valor de ajuste del modelo explica un porcentaje considerable de la producción de materia seca en tallos, dejando de lado los factores de error dentro del modelo de producción, tal como es el efecto de la parcela.

2.6.2.3. Masa seca de raíz

La biomasa seca en raíz cumple con los criterios antes mencionados para hojas y tallos. A partir de la quinta y hasta la octava semana, se observa una producción creciente de biomasa en los tres tratamientos de fertilización. Posterior a la octava y hasta la décima semana, se da el punto de máxima acumulación de masa seca en la raíz, punto en el cual la producción de materia seca es decreciente hasta la semana catorce, figura 27 Este comportamiento indica que, a partir de la semana diez, cesa la producción de raíces de las plantas de papa; disminución que se refleja en el decrecimiento de la masa seca, además,

Tabla 44. Parámetros del modelo estadístico cuadrático para la variable respuesta tallo

Coefficientes	Estimate	Std.Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-12,0986	1,540633	-7853	0,00	***
tto_F1500	0,11	0,10	1191,00	0,24	
tto_F3000	0,17	0,10	1796,00	0,07	
par_F2	0,05	0,16	299,00	0,77	
par_F3	-0,09	0,16	-563,00	0,57	
par_F4	0,13	0,16	832,00	0,41	
par_F5	-0,16	0,16	-1014,00	0,31	
par_F6	-0,13	0,16	-802,00	0,42	
par_F7	-0,46	0,16	-2887,00	0,00	**
par_F8	-0,34	0,16	-2140,00	0,03	*
par_F9	-0,17	0,16	-1086,00	0,28	
s	4,23	0,54	7805,00	0,00	***
s ²	-0,36	0,06	-5998,00	0,00	***
s:s ²	0,01	0,00	4703,00	0,00	***
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0,4486 on 132 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0,8188, Adjusted R-squared: 0,8037					

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, R-squared: R_ajustado

2.6.2.3.1. Análisis de varianza para variable respuesta raíz

De acuerdo con el análisis de varianza realizado, no existen diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización aplicados; ello se refleja en el comportamiento de la curva y en la predicción de materia seca de raíces a medida que el cultivo crece y se desarrolla, tabla 45. Sin embargo, en un nivel de fertilización de 3000 Kg. de fertilizante 10-20-20/ha, se observa una mayor respuesta en la producción de biomasa seca en las raíces de las plantas, con un beta estimado, de 0.15. Tal efecto aunque es estadísticamente significativo, no es evidente en su efecto en la producción del cultivo, vista como la biomasa total de tubérculos por parcela, figura 28.

2.6.2.3.2. Parámetros del modelo estadístico variable respuesta raíz

Teniendo en cuenta los parámetros que definen el modelo, se considera el efecto del tiempo lineal, cúbico y cuadrático, como determinantes en la tendencia de crecimiento del material vegetal, evidenciado en la producción de materia seca del cultivo; ajustados al 78%, con un error aproximado del 22%; es decir, el 78 % de la masa seca de raíces se explica en función de la variable tiempo, en semanas, siendo las variables s, s², s³ y sus interacciones, las de mayor efecto.

Se observa también que el intercepto es estadísticamente significativo y el poco efecto de las parcelas sobre el ajuste del modelo, atribuido al error experimental, tabla 46.

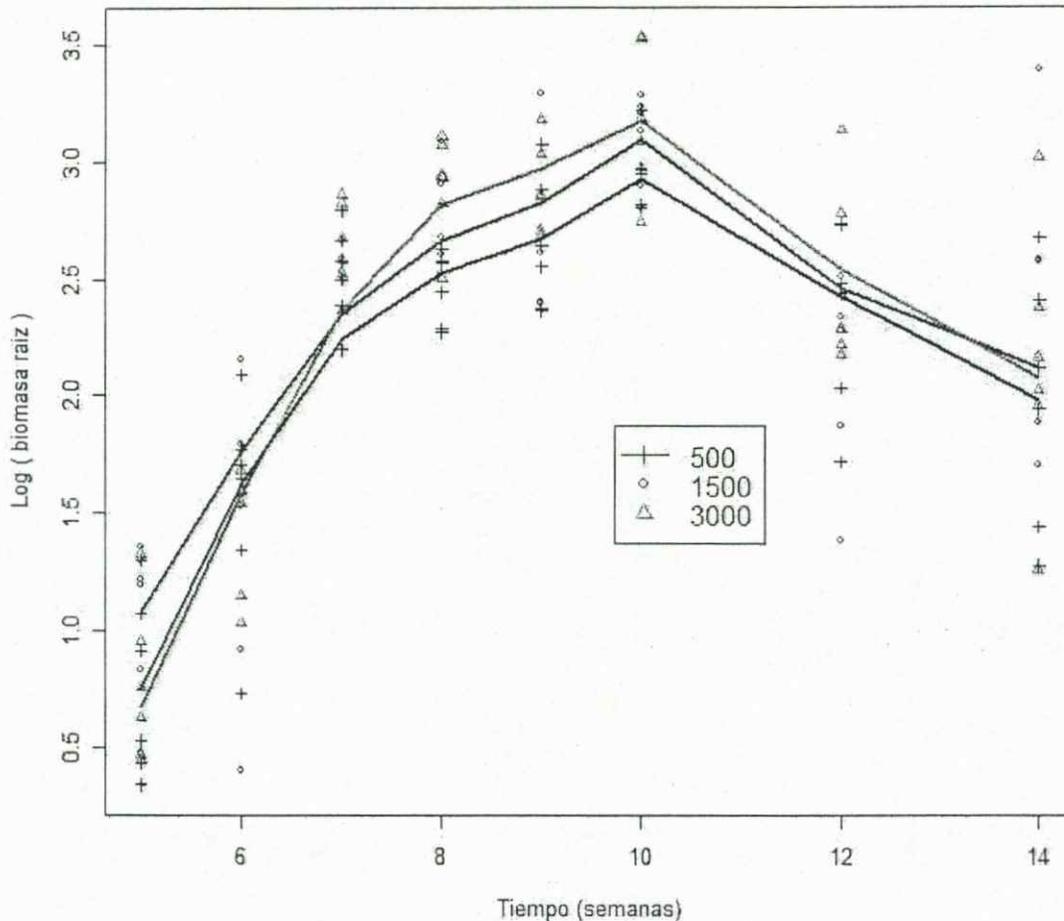


Figura 27. Acumulación de masa seca en raíces de papa, *Solanum tuberosum* L. Var. Diacol Capiro, con tres niveles (500,1500 y 3000 kg/ha) de un fertilizante grado 10-20-20.

Tabla 45. Análisis de varianza factores de la variable respuesta raíz

Fuente de Var	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
tto_F	2	0.59	0.29	2.32	0.10	
par_F	6	1.23	0.21	1.62	0.15	
s	1	15.57	15.57	123.01	< 2,2e-16	***
s ²	1	44.59	44.59	352.21	< 2,2e-16	***
S ³	1	3.83	3.83	30.22	0.00	***
s:s ³	1	0.80	0.80	6.32	0.01	*
s ² :s ³	1	0.00	0.00	0.03	0.86	
s:s ² :s ³	1	2.99	2.99	23.63	0.00	***
Residuals 12	9	16.33	0.13			

Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, R-squared: R_ajustado

2.6.2.4. Masa seca de tubérculos

La producción total de biomasa seca en tubérculos se indica en la figura 29. La acumulación de materia seca en tubérculos presenta un incremento continuo a partir de la quinta y sexta semana del cultivo, posterior a las prácticas de aporque; siendo consecuente con la acumulación de biomasa seca en hojas, tallos y raíces, figura 30.

Entre la sexta y la octava semana se observa un crecimiento acelerado de acumulación de biomasa en los tubérculos, y a partir de la semana de floración (semanas 8 y 9), los incrementos en la producción de materia seca de tubérculos son menores hasta la semana doce.

Se debe hacer énfasis en la importancia de la etapa de floración para el cultivo, puesto que, es en este momento donde la planta deja de invertir energía metabólica en la producción de hojas, tallos y raíces, para iniciar un proceso de traslocación de los diferentes nutrientes y asimilados, para el llenado de los tubérculos. Este proceso no presentó diferencias significativas entre los diferentes niveles de fertilización evaluados, tabla 47.

Tabla 46. Parámetros del modelo cúbico para la variable respuesta raíz

Coefficientes	Estimate	Std.Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	756.20	156.50	4.83	0.00	***
tto F1500	0.10	0.07	1.42	0.16	
tto F3000	0.15	0.07	2.08	0.04	*
par F2	0.16	0.13	1.26	0.21	
par F3	0.03	0.13	0.27	0.79	
par F4	0.12	0.13	0.99	0.33	
par F5	-0.02	0.13	-0.20	0.84	
par F6	-0.03	0.13	-0.23	0.82	
par F7	-0.24	0.13	-1.89	0.06	
par F8	-0.06	0.13	-0.45	0.65	
par F9	0.11	0.13	0.84	0.40	
s	-563.00	115.90	-4.86	0.00	***
s ²	169.80	34.86	4.87	0.00	***
s ³	-26.58	5.46	-4.87	0.00	***
s:s ³	2.28	0.47	4.87	0.00	***
s ² :s ³	-0.10	0.02	-4.86	0.00	***
s:s2:s3	0.00	0.00	4.86	0.00	***

Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3558 on 129 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.8099, Adjusted R-squared: 0.7893

F-statistic: 39.27 on 14 and 129 DF, p-value: < 2.2e-16

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, R-squared: R_ajustado

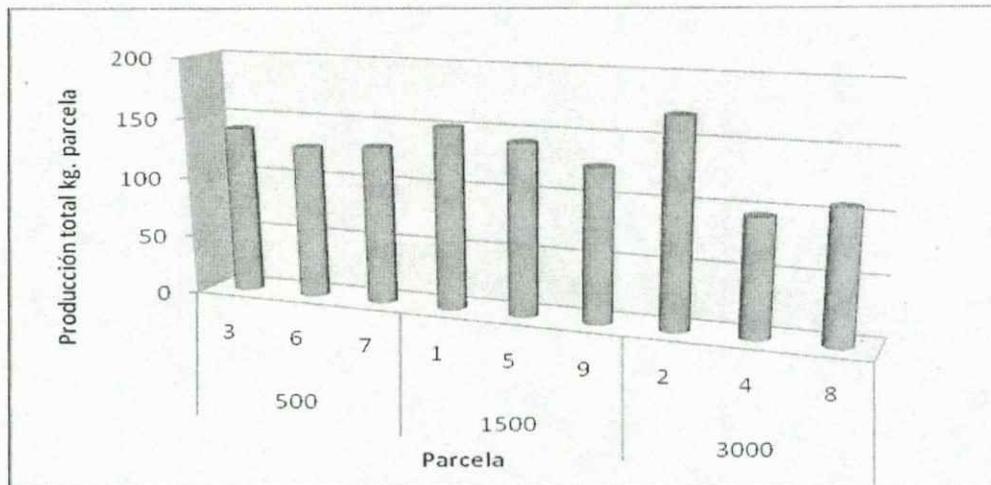


Figura 28. Biomasa fresca total (g) en tubérculos, primer ciclo de cultivo

Es importante destacar el contraste que se produce en la planta al cambiar de etapa vegetativa a reproductiva, puesto que las curvas de crecimiento evaluadas para hojas, tallos y raíces, reflejan el mismo comportamiento desde el inicio de los muestreos en campo (quinta semana después de siembra), hasta llegar floración (novena y décima semana después de siembra); punto en el cual se da la máxima acumulación de materia seca en la planta. Partiendo de este punto, la planta frena la energía metabólica que es invertida en la producción de hojas, tallos y raíces, e invierte esta en el llenado y nutrición del tubérculo (figura, 30), generándose así el estado de senescencia de las plantas, hasta llegar al final de su etapa reproductiva donde esta muere.

La etapa reproductiva del cultivo, incluye los eventos de floración, fructificación, llenado de tubérculos y madurez fisiológica. Esta etapa comienza con la diferenciación de los tubérculos y de forma simultánea se da con la aparición de los primeros botones florales o con el inicio de la floración. El agua y los nutrientes se mueven hacia los tubérculos, con lo que se induce su crecimiento, por acumulación de elementos y compuestos metabolizados en la fotosíntesis. FEDEPAPA, (2005).

El contenido de materia seca de la planta representa aproximadamente el 20% del peso total del tubérculo, esta variable es controlada genéticamente y presenta alta heredabilidad, por lo tanto cambia considerablemente entre variedades; sin embargo, no hay un valor constante de materia seca para una variedad, debido a que es afectada por las condiciones de madurez, clima, suelo y prácticas de manejo. Castro y Guío, (1998).

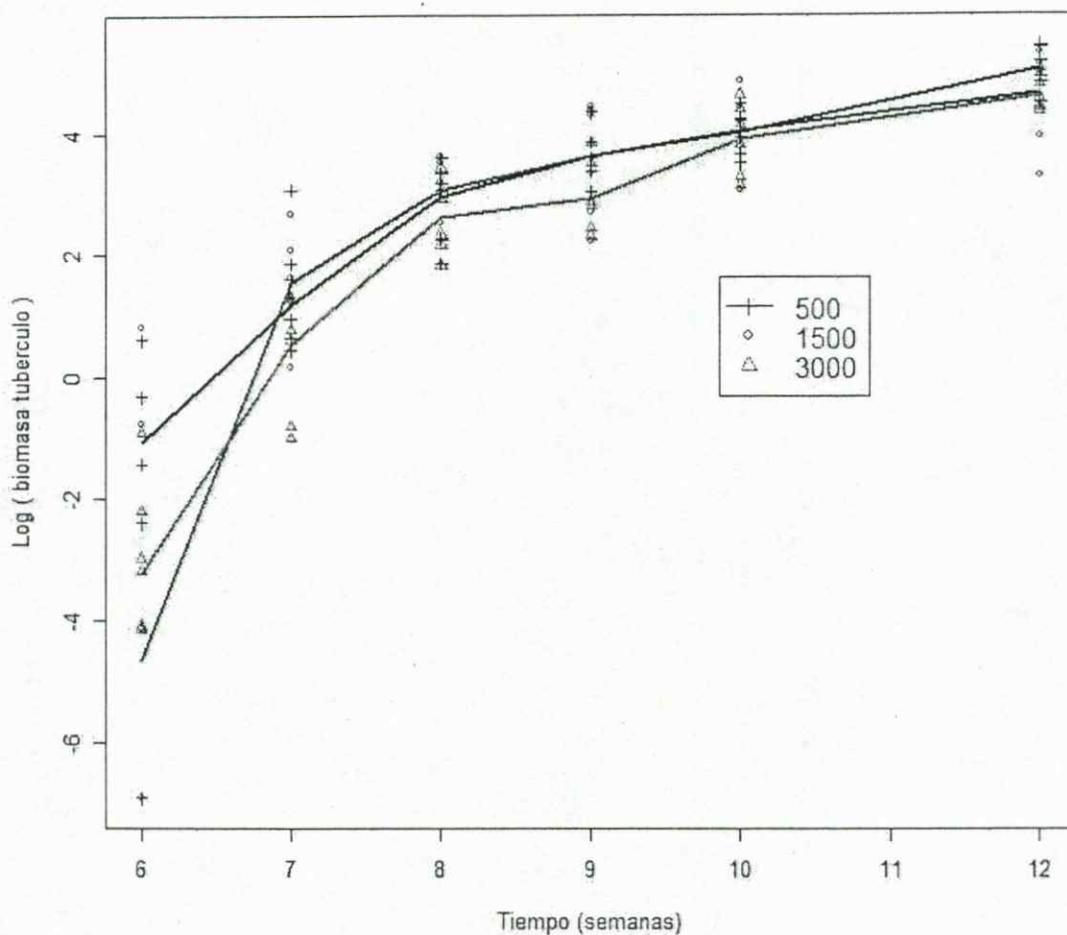


Figura 29. Acumulación de masa seca en tubérculos de papa, *Solanum tuberosum* L. Var. Diacol Capiro, con tres niveles (500, 1500 y 3000 kg/ha) de un fertilizante grado 10-20-20.

2.6.2.4.1. Análisis de varianza para variable respuesta tubérculo

En el análisis de varianza se destaca el efecto del tiempo lineal, cuadrático y cúbico con una ligera influencia del tratamiento de 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20, no obstante no se consideró como relevante para la determinación del modelo, tabla 47.

2.6.2.4.2. Parámetros del modelo estadístico para variable respuesta tubérculo

Dentro de los parámetros que definen el modelo se encuentran el intercepto y el tiempo, ajustados al 80% de predicción, con un margen de error del 20%, atribuido al error experimental, tabla 48. El establecimiento del modelo de crecimiento en tubérculos, está determinado por el factor tiempo, expresado de forma lineal, cuadrática y cúbica. Este tipo de modelo similar para tubérculos y raíces, es un poco más complejo.

Cuando se busca establecer modelos que definan un comportamiento determinado, se intenta al máximo que, el modelo explique de la forma más sencilla el comportamiento

observado para el factor en estudio. En el caso de no ser posible, se deben establecer modelos por separado, que fundamenten el comportamiento particular de cada variable; como sucede en este caso específico.

Podría atribuirse este efecto a la complejidad fisiológica del cultivo de papa; puesto que presenta un desarrollo aéreo vegetativo, en el cual hace parte la modificación del tallo para la producción de tubérculos. Además esta determinado por ciclos fisiológicos característicos, tales como la floración e inicio de tuberización. Por lo cual es necesario formular modelos más acordes con las manifestaciones en campo del cultivo.

Tabla 47. Análisis de varianza factores de la variable respuesta tubérculos.

Fuente de Var	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
tto F1	2	7.63	3.82	2.6619	0.07476	.
par F1	1	5.72	5.72	3.9882	0.04854	*
s	1	486.26	486.26	339.0989	< 2,2e-16	***
s ²	1	115.44	115.44	80.5066	1.76E-014	***
s ³	1	25.72	25.72	17.9361	5.09E-005	***
Residuals 10	0	143.4	1.43			

Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, R-squared: R_ajustado

Tabla 48. Parámetros del modelo cúbico de la variable respuesta tubérculos

Coefficientes	Estimate	Std.Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-90.03	14.85	-6.06	0.00	***
tto F11500	-0.34	0.28	-1.21	0.23	
tto F13000	-0.68	0.28	-2.38	0.02	*
par F1	-0.06	0.05	-1.37	0.18	
s	28.13	5.23	5.38	0.00	***
s ²	-2.80	0.60	-4.70	0.00	***
s ³	0.09	0.02	4.24	0.00	***

Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 1,197 on 100 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0,8171, Adjusted R-squared: 0,8062

F-statistic: 74,48 on 6 and 100 DF, p-value: < 2,2e-16

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, R-squared: R_ajustado

2.6.2.5. Masa seca total

La masa seca total o el crecimiento individual de cada uno de los órganos, observada durante todo el periodo de desarrollo del cultivo, evidencia un incremento en la biomasa total de la planta, hasta la semana 10, a partir de la cual hay una estabilización hasta la

semana 12 y empieza a declinar a partir de esta semana, por el efecto de senescencia del cultivo, figura 30

No hay diferencia alguna entre los tres tratamientos de fertilización evaluados, es decir, no existen diferencias significativas para cada uno de los factores de biomasa (hojas, tallos, raíces y tubérculos).

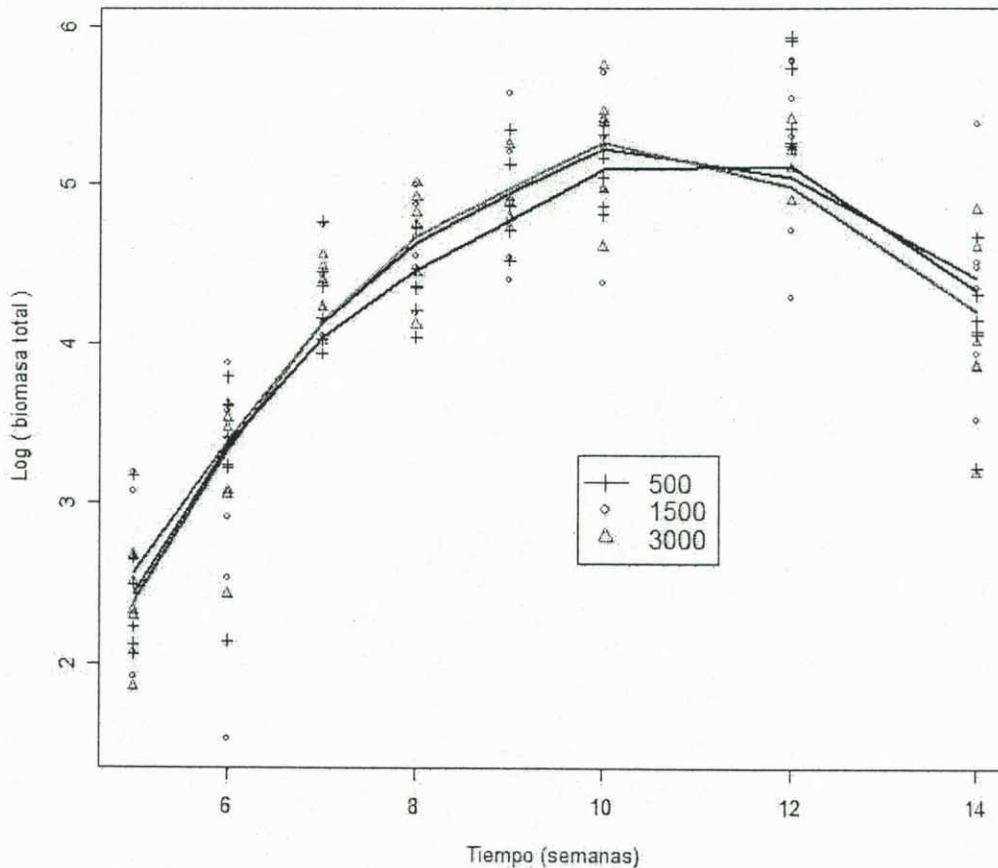


Figura 30. Acumulación de biomasa seca total de papa, *Solanum tuberosum* L. Var. Diacol Capiro, con niveles (500,1500 y 3000 kg/ha) de un fertilizante grado 10-20-20

2.6.2.5.1. Análisis de varianza para factor masa seca total

El análisis de varianza para la biomasa total, indica que es estadísticamente significativa en el tiempo lineal, cuadrático y cúbico, lo cual implica como ya se había mencionado un modelo más complejo que define la distribución de biomasa total en la planta, durante su periodo de desarrollo.

De forma similar se observa que no existe un efecto directo del tratamiento y la parcela en la distribución de la materia seca total en la planta, tabla 49.

Tabla 49. Análisis de varianza factores acumulación de biomasa total

Fuente de Variación	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
tto F	2	0.04	0.02	0.13	0.88	
par F	6	2.91	0.48	2.85	0.01	*
s	1	52.40	52.40	308.37	< 2e-16	***
s ²	1	69.57	69.57	409.40	< 2e-16	***
s ³	1	0.38	0.38	2.21	0.14	
s:s ³	1	0.50	0.50	2.95	0.09	,
s ² :s ³	1	0.81	0.81	4.74	0.03	*
s:s ² :s ³	1	1.04	1.04	6.11	0.01	*
Residuals 12	9	21.92	0.17			

Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, R-squared: R_ajustado

2.6.2.5.2. Parámetros del modelo estadístico cúbico

Entre los parámetros del modelo a considerar, se tienen en cuenta el efecto del intercepto y del tiempo, en donde se obtiene un ajuste del 83% en la distribución de la materia seca total de la planta; asumiendo un 17% de error experimental, atribuido al efecto de los bloques y a factores climáticos y agronómicos (daño ocasionado por enfermedades, o mecánico), tabla 50.

2.6.3. Modelos de producción de masa seca

Después de realizar el análisis estadístico, para cada uno de los factores que intervinieron en el estudio de crecimiento, se obtuvieron cinco modelos de crecimiento diferentes. En cada uno de ellos, se puede resaltar el alto grado de significancia estadística y su valor de ajuste alto, evidenciado en la producción de masa seca total del cultivo, lo que implica que bajo las condiciones planteadas en la parte experimental, se cuenta con un alto grado de confianza y de certeza en el comportamiento del cultivo. La tabla 51, resume los modelos estadísticos obtenidos para la producción de masa seca en los diferentes órganos de la planta y en la masa total

2.6.4. Distribución de nutrientes en la biomasa seca del cultivo.

La importancia de conocer la distribución de los nutrientes en la planta, se fundamenta en el hecho de diferenciar las etapas críticas de cada uno de los elementos indispensables para obtener un desarrollo nutricional adecuado del cultivo.

En la medida en que se conozca la etapa fisiológica específica en la que un elemento deba estar presente en la planta, se realizará una fertilización adecuada, en el momento oportuno según los requerimientos de la planta, optimizando así los costos de producción y evitando un uso ineficiente de los fertilizantes en el cultivo.

Para determinar la dinámica de absorción de los iones por parte de la planta, se abordó un análisis basado en la concentración de los iones en los diferentes órganos de la planta (% masa seca), determinando las tasas instantáneas de absorción en cada órgano y en el total de las plantas. Sin embargo, dado que existe un factor de dilución determinado por la tasa de crecimiento de cada órgano y un factor de traslocación entre los diferentes órganos, debe realizarse un modelamiento basado en balance de masas, comparando las tasas de acumulación total en función de masa órgano, lo que permite establecer las tasas de absorción y traslocación en cada órgano que al ser estimadas posibilitan la determinación de la dinámica de cada ión.

Según Villamil, 2005, las plantas de papa requieren unos nutrientes básicos para su desarrollo dentro de los cuales se destacan nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Un 50% del total de la absorción de estos elementos por la planta ocurre durante el periodo comprendido entre la emergencia y el inicio de la floración.

Tabla 50. Parámetros estadísticos de crecimiento acumulación de biomasa total

Fuente de Var	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
(Intercept)	490.9	181.3	2.71	0.01	**
tto F1500	0.04	0.09	0.48	0.63	
tto F3000	0.01	0.09	0.17	0.87	
par F2	0.02	0.15	0.11	0.91	
par F3	0.04	0.15	0.27	0.79	
par F4	-0.02	0.15	-0.12	0.9	
par F5	-0.13	0.15	-0.92	0.36	
par F6	-0.1	0.15	-0.67	0.5	
par F7	-0.35	0.15	-2.42	0.02	*
par F8	-0.37	0.15	-2.51	0.01	*
par F9	-0.15	0.15	-1.02	0.31	
s	-360.2	134.2	-2.68	0.01	**
s ²	107.2	40.39	2.66	0.01	**
s ³	-16.52	6.32	-2.61	0.01	*
s:s ³	1.4	0.54	2.57	0.01	*
s ² :s ³	-0.06	0.02	-2.52	0.01	*
s:s ² :s ³	0	0	2.47	0.01	*
Signif. codes: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 '.' 1					
Residual standard error: 0.4122 on 129 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.8534, Adjusted R-squared: 0.8375					
F-statistic: 53.65 on 14 and 129 DF, p-value: < 2.2e-16					

tto: tratamiento, par: parcela, s: tiempo lineal, s²: tiempo cuadrático, R-squared: R_ajustado

Tabla 51. Modelos estadísticos para producción de masa seca

Órgano	Modelo	R-squared adjusted	P_ value del modelo
Raíz	$Y = -0,46\text{Par} + 0,15\text{tto} - 563s + 169,8s^2 - 26,58s^3$	0.7893	< 2.2e-16
Tubérculo	$Y = \text{Par} - 0.62580\text{tto} + 6.44265s - 0.29532s^2$	0.7645	< 2.2e-16
Tallo	$Y = -0,46\text{Par} + 0,17\text{tto} + 4,23s - 0,36s^2$	0,8037	< 2.2e-16
Hojas	$Y = - 0,35 \text{Par} - 0,06\text{tto} + 1,42s - 0,07s^2$	0.6285	< 2.2e-16
Masa total	$Y = - 0,37\text{Par} + 0,04\text{tto} - 360,20s + 107,20s^2 - 16,52s^3$	0.8375	< 2.2e-16

Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Par: parcela. tto: tratamiento (N, P, K). s : tiempo lineal. s²: tiempo cuadrático. s³: tiempo cúbico

Según Polevoy, 1983, citado por Kadaja et al, 2004, las plantas de papa solo traslocan un 30% de la biomasa acumulada en otros órganos hacia los tubérculos, la biomasa remanente se considera material vegetal senescente que se reincorpora al suelo luego de la cosecha, bajo este criterio un órgano pierde su funcionalidad una vez su biomasa se disminuye en un 30%, que se supone es traslocado a otros órganos.

2.6.4.1. Nitrógeno

2.6.4.1.1. Nitrógeno presente en hojas

La distribución de N en la biomasa seca de las hojas, es mayor en las primeras etapas de desarrollo vegetativo de la planta. A partir de la quinta semana (en el momento del aporque), se observó un porcentaje de nitrógeno acumulado en hojas mayor, con respecto al nitrógeno de la sexta semana en adelante, figura 31.

En la octava semana de desarrollo, se observó un menor porcentaje de N disponible en la biomasa de las hojas, manteniéndose constante hasta la semana diez, donde cesa la floración e inicia el proceso de llenado de los tubérculos. A partir de dicho punto disminuye el porcentaje de nitrógeno disponible en la materia seca de las hojas hasta la semana 14.

Tales resultados evidencian la importancia que representa la presencia de nitrógeno en las primeras semanas de desarrollo del cultivo en el factor hojas, siendo menos indispensable en la semana de floración y llenado de tubérculos.

2.6.4.1.1.1. Parámetros del modelo estadístico de la variable respuesta N en masa seca de hojas.

En los parámetros que definen el modelo estadístico se observa una influencia significativa del tratamiento de 1,500 y de 3,000 kg fertilizante 10-20-20/ha y un efecto del tiempo lineal y cuadrático, tabla 52.

El efecto observado en la aplicación de los diferentes tratamientos de fertilización, muestran que en la medida en que la fertilización es mayor, la planta asimila mayor cantidad de nutrientes y esta mayor absorción no se traduce de forma directa en la producción de tubérculos por parcela.

Es importante resaltar que no hay diferencias significativas en los contenidos de N en las hojas para el tratamiento de 1500 y de 3000 kg fertilizante/ha.

El efecto causado por los tratamientos, puede ser interpretado a partir del consumo de N por la planta, en la medida en que se le suministre mayor cantidad de nutrientes, la planta los absorbe como consumo de "lujo", no se traducen en producción de tubérculos, si bien puede utilizar ese N en componentes metabolitos, como la solanina, etc.

2.6.4.1.2. Nitrógeno presente en tubérculos

El nitrógeno en la masa seca de tubérculos y a lo largo del desarrollo de la planta tiene una tasa de absorción de tendencia constante, siendo mayor la disponibilidad para el tratamiento de 1500 y 3000 kg fertilizante 10-20-20/ha. En el tratamiento de 500 kg a medida que las plantas crecen hay menor concentración de este elemento en el tubérculo.

A partir de la quinta semana después de siembra (primera evaluación y aporque), hasta la novena (etapa de floración), se da una disminución en el contenido de nitrógeno en la masa seca de los tubérculos, siendo constante hasta la semana 14 para los niveles de 1500 y 3000 kg fertilizante 10-20-20/ha. Esto implica que el mayor contenido de nitrógeno debe estar disponible para los tubérculos, en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, figura 32.

En el tratamiento de 500 kg de fertilizante, se observa una situación similar en las primeras etapas de desarrollo de las plantas, siendo menor la cantidad de N en los tubérculos a partir de la floración, semana octava y continua así hasta llegar a la última semana de evaluación, semana 14.

2.6.4.1.3. Nitrógeno presente en masa seca total

El nitrógeno inicial presente en la biomasa seca total de las plantas, es menor a medida que se produce el desarrollo del cultivo a través del tiempo. Esta situación se hizo evidente a partir de la octava semana después de siembra, hasta llegar a la semana 10, en donde se produjo una redistribución del nitrógeno, en dirección a los tubérculos para producción y llenado, figura 33.

La disponibilidad de nitrógeno en los tratamientos de 1,500 y 3,000 kg/ha de fertilizante 10-20-20, fue mucho mayor que para el tratamiento de 500kg/ha, por lo que se observó, que gran parte de este elemento se encontraba distribuido en la biomasa de los tubérculos, posterior a realizar un proceso de transporte a través de la planta.

Las diferencias existentes en la distribución del nitrógeno en los tres tratamientos de fertilización evaluados, se reflejan de forma directa en la producción de biomasa aérea (hojas y tallos) y de forma consecuente en la producción de tubérculos en planta.

El nitrógeno es requerido en mayor concentración en el estado vegetativo de la planta, principalmente en hojas y tallos, debido a que éste es de suma importancia para la formación de proteínas, y posterior a ello los elementos nutricionales de la planta pasan a ser parte de los tubérculos, cumpliendo sus funciones en la producción y llenado de tubérculos.

Tabla 52. Parámetros del modelo estadístico de distribución de nitrógeno en hojas

Coefficientes	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercepto)	2,218055	0,182509	12,153	< 2e-16	***
B_F2	0,049943	0,039859	1,253	0,214698	
B_F3	0,091825	0,039859	2,304	0,024445	*
tto_F1500	0,111282	0,039859	2,792	0,006874	**
tto_F3000	0,153887	0,039859	3,861	0,000263	***
s	0,040396	-3119		0,002707	**
s ²	0,004887	0,002111	2,315	0,023785	*
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0,1381 on 65 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0,4831, Adjusted R-squared: 0,4354					
F-statistic: 10,13 on 6 and 65 DF, p-value: 6,965e-08					

2.6.4.1.3.1. Parámetros del modelo estadístico de la variable respuesta N en masa seca total

En los parámetros estadísticos a considerar para el factor nitrógeno presente en la masa seca total de la planta, se encuentran el intercepto, los tratamientos de 1500 y 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20 y finalmente el tiempo lineal, los cuales son estadísticamente significativos para la explicación de la distribución del ión en la planta; ajustan al 74% de certeza en la explicación del modelo de la distribución, asumiendo un 24 % de error experimental, tabla 53.

2.6.4.1.4. Distribución de nitrógeno en la planta de papa

La distribución de nitrógeno total en las plantas de papa, para el tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20, se presenta en la tabla 54. La concentración de N es decreciente en la medida en que las plantas se desarrollan, presentando mayor contenido de nitrógeno en hojas y tallos al inicio del cultivo.

Durante las dos primeras mediciones realizadas, no se observó una cantidad significativa de nitrógeno en raíces y tubérculos, siendo totalmente nula para este ultimo. Para la séptima semana de evaluación (tercera medición), se observó una redistribución del nitrógeno en la planta, siendo menor en hojas y tallos, y aumentando para raíces y tubérculos, situación que se hizo mas evidente a medida que transcurría el crecimiento de las plantas.

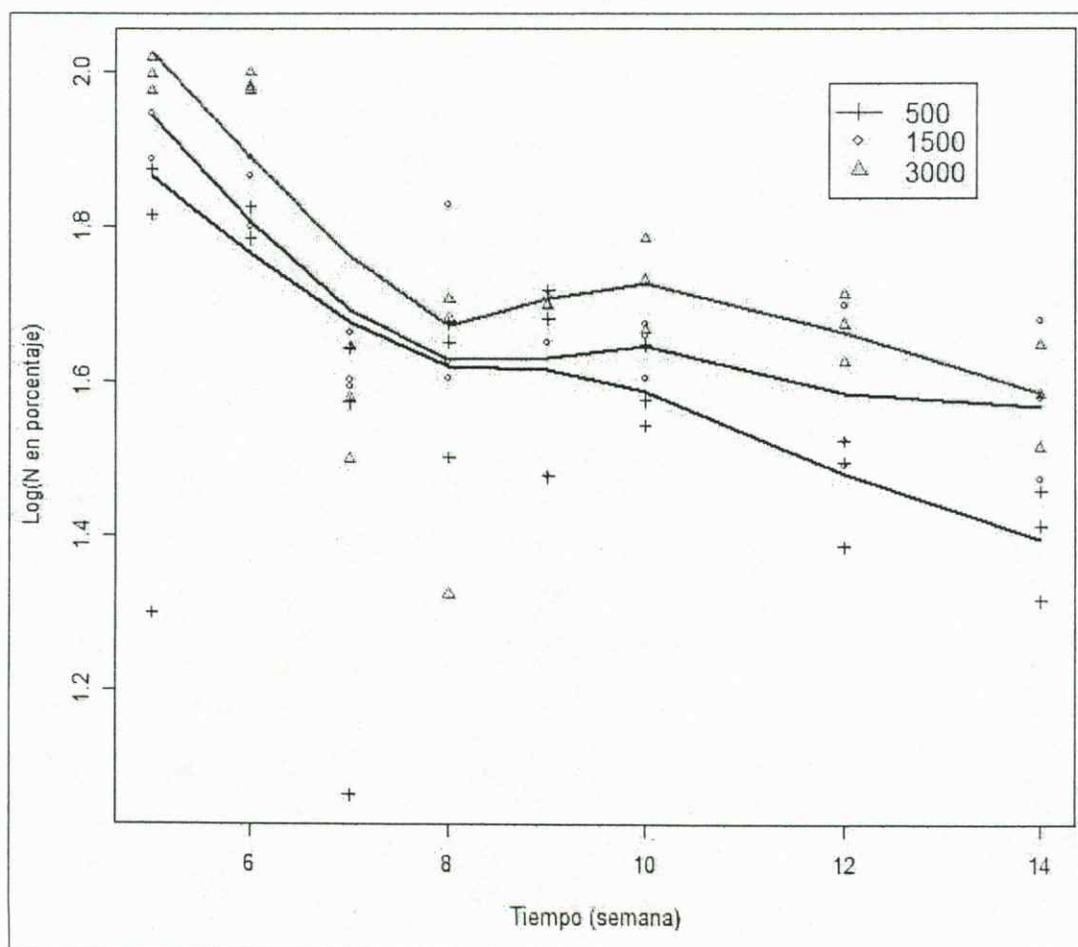


Figura 31. Concentración de N (%) en masa seca de hojas, con tres niveles de aplicación un fertilizante grado 10- 20-20.

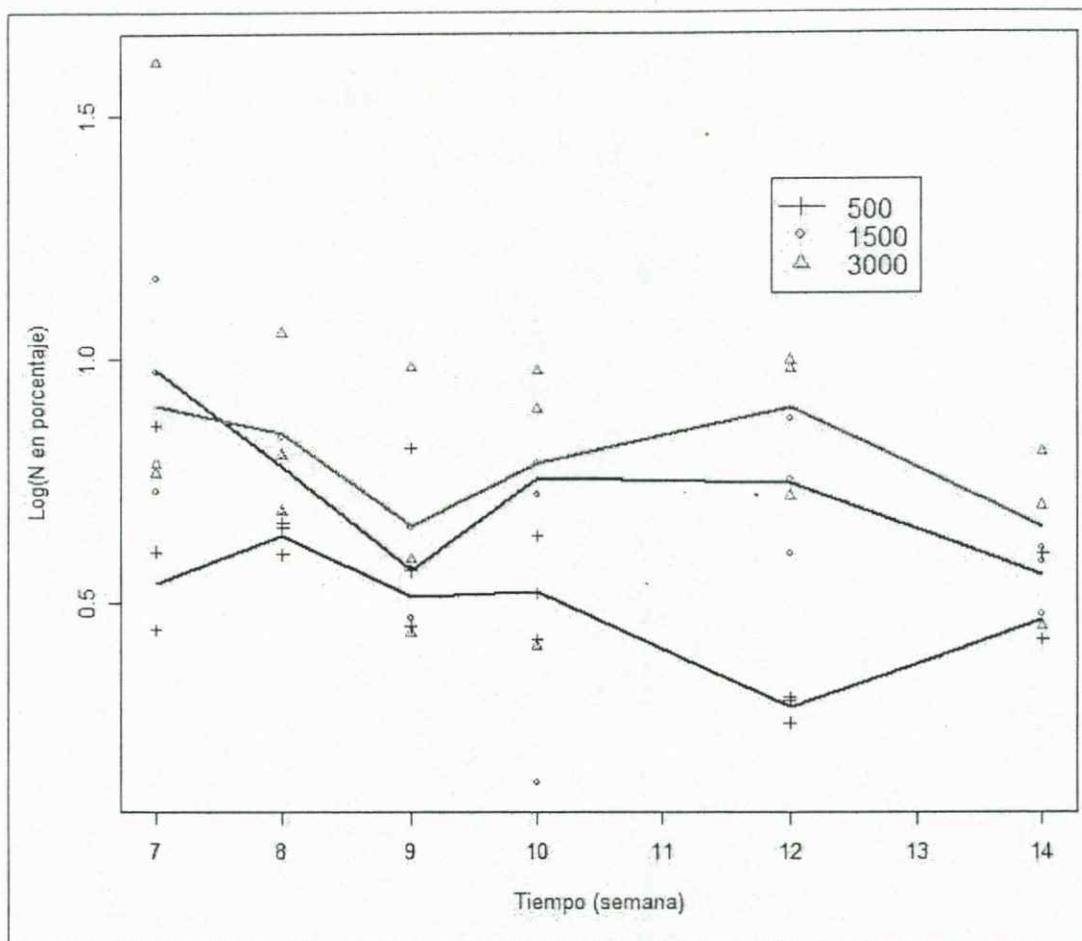


Figura 32. Concentración de N (%) en tubérculos, con tres niveles de aplicación un fertilizante grado 10- 20-20.

Tabla 53. Parámetros de variable respuesta N en masa total.

Coeficientes	Estimate	Std,Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	2,789042	0,036030	77,409	< 2e-16	***
B F2	0,035346	0,023009	1,536	0,129	
B F3	0,049535	0,023009	2,153	0,035	*
tto F1500	0,095969	0,023009	4,171	9,04e-05	***
tto F3000	0,170556	0,023009	7,413	2,98e-10	***
s	-0,040712	0,003299	-12,342	<2e-16	***
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0.0797 on 66 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.763, Adjusted R-squared: 0.7451					
F-statistic: 42,5 on 5 and 66 DF, p-value: < 2,2e-16					

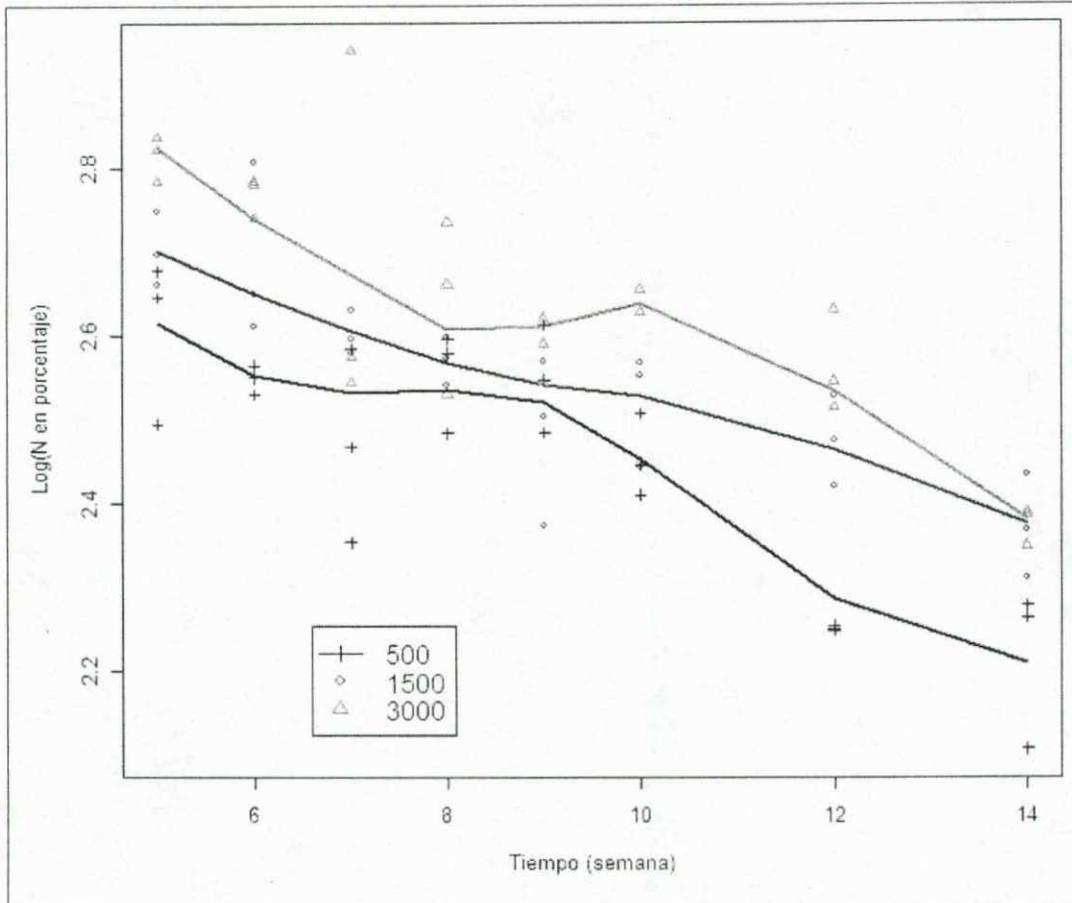


Figura 33. Concentración de N (%) en masa seca total con tres niveles de un fertilizante grado 10- 20-20.

El punto de máxima acumulación de nitrógeno en las hojas, se obtuvo en la semana 12 de evaluación, destrucción 7 (2.189 g); en los tubérculos se obtuvo un máximo de nitrógeno para la semana 14 (3.693g), octava medición; tallo y raíces coincidieron en su máxima acumulación de nitrógeno en la semana 10 (destrucción 6), con 1,356 g y 0,402 g respectivamente.

En la semana 7 de evaluación, aparecen formados los primeros tubérculos, por lo cual se reporta la primera concentración de N en éstos, y en la siguiente semana se dio una disminución considerable en el contenido de nitrógeno en tallos y hojas, también se presenta esta situación con menor intensidad para raíces.

Durante la séptima semana de evaluación, destrucción 3, se produjo un incremento significativo en la cantidad de nitrógeno disponible en tubérculos, que se hizo constante hasta la última semana de evaluación (8) del cultivo (semana 14).

Tabla 54. Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20.

Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	N1(5)	Ps	Sd	N2(6)	Ps	Sd	N3(7)	Ps	Sd	N 4(8)
Hoja	6,807	0,053	0,336	12,728	0,344	0,773	31,565	0,253	1,290	19,273	0,066	0,958
Tallo	3,513	0,073	0,172	9,850	0,177	0,398	24,490	0,233	0,792	27,668	0,064	0,943
Raíz	2,290	0,034	0,077	5,097	0,049	0,138	12,655	0,066	0,310	11,862	0,060	0,303
Tubér.	0,000	0 + 0,001	0,001	0,795	0,000	0,001	6,580	0,088	0,119	21,260	0,198	0,405
Total	12,610	0,161	0,585	28,470	0,571	1,309	75,290	0,641	2,511	80,064	0,387	2,609
Delta	0,117		0,724			1,202			0,098			
Órgano	Ps	Sd	N5(9)	Ps	Sd	N6(10)	Ps	Sd	N7(12)	Ps	Sd	N8(14)
Hoja	40,055	0,484	1,984	41,723	0,300	2,044	50,355	0,121	2,189	25,718	0,224	1,028
Tallo	37,177	0,534	1,197	47,033	0,274	1,356	46,387	0,207	0,956	30,505	0,078	0,589
Raíz	14,628	0,042	0,367	18,895	0,030	0,402	11,220	0,042	0,192	8,145	0,030	0,119
Tubér.	41,708	0,447	0,804	59,150	0,264	0,984	166,460	0,214	2,221	227,218	0,926	3,693
Total	133,568	1,507	4,352	166,802	0,868	4,787	274,422	0,584	5,558	291,587	1,258	5,430
delta	1,743		0,435			0,386			-0,064			

Ps: Promedio de peso seco (g) por órgano. Sd: Desviación estándar. $N_{X(Y)}$: Contenido de nitrógeno (g)/planta, en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. Y: Semana de desarrollo del cultivo

De la semana 7 a la semana 8, se observa un incremento en la concentración de N en los tubérculos, lo cual coincide con la semana de floración y plantea una redistribución de N de hojas y tallos hacia este órgano.

En la semana 9, siguiente a floración, se observó un incremento en los contenidos de nitrógeno en todos los factores evaluados, siendo casi el 100% para hojas y tubérculos, aumentando en menor cantidad para raíces y tallos, lo cual implica que el contenido de nitrógeno presente en tallos y raíces fue direccionado hacia los tubérculos.

Desde la semana 10 del cultivo y hasta la semana 12 (destrucción 7), el contenido de nitrógeno en hojas es creciente; en la semana 14, destrucción 8, su concentración en las hojas disminuye en forma considerable, pero el N presente en los demás órganos aumenta, con un incremento importante en los tubérculos.

Para tallos, raíces y tubérculos, solo se obtuvo un incremento en la concentración de N hasta las semana 10 (destrucción 6); a partir de la semana 12 (destrucción 7), el contenido de N en tallos y raíces disminuye y aumenta respectivamente en tubérculos. En esta semana 12, el contenido de N en hojas se mantiene relativamente constante.

Finalmente en la semana 14, destrucción No 8, se observa una disminución en el contenido de N de hojas, tallos y raíces, pero en los tubérculos el contenido de N alcanza su punto máximo.

Es evidente que el cultivo requiere de manera continua disponibilidad de nitrógeno durante su desarrollo, por lo cual se hace necesario realizar aplicaciones de este elemento en siembra y aporque.

Para el tratamiento de 1500 kg/ha de fertilizante 10-20-20, la distribución del N es similar al tratamiento de 500 kg/ha, en aquel (1500 kg), se presenta mayor cantidad de nitrógeno para la planta, tabla 55. En la medida en que transcurre el tiempo de desarrollo del cultivo, la cantidad de N asimilado por la planta es exponencial, debido a que las plantas son más vigorosas y absorben cantidades superiores al tratamiento de 500kg/ha de fertilizante.

Para la primera y la segunda medición se observa un incremento en el contenido de N en hojas, tallos y raíces, y en tubérculos es constante. En la sexta semana de desarrollo del cultivo (destrucción 2) el proceso de tuberización de las plantas no había iniciado y por ende no hay nitrógeno en tubérculos.

El incremento en la concentración de N se hizo continuo, en hojas, tallos y raíces, hasta la semana 7 y 8 (destrucción 3 y 4), donde se presenta el inicio de la floración de las plantas de papa y se observaron los primeros tubérculos. En este estado de desarrollo del cultivo, se produjo un aumento en el contenido de N, para tallos y raíces, además, se observa una disminución en el contenido de nitrógeno en las hojas, el cual se debe redistribuir para el tallo y la raíz, pero principalmente para el tubérculo, el cual presentó un incremento significativo en este momento de desarrollo del cultivo.

Hacia la semana 9 (destrucción 5), se tenían plantas mucho más grandes y vigorosas, el nitrógeno se encuentra en mayor concentración en las hojas, tallos y tubérculos, además, hay una disminución en el contenido de nitrógeno presente en las raíces, con respecto a la semana anterior, lo cual indica que el elemento se movió en dirección al tubérculo, aumentando su concentración en dicho órgano.

Hasta la destrucción 6 (semana 10), el contenido de N es mayor a la anterior evaluación para todos los factores, hasta llegar la semana 12 y 14 (destrucciones 7 y 8) en donde el contenido de nitrógeno presente en hojas, tallos y raíces disminuye, lo cual indica que este elemento se traslocó hacia los tubérculos para producción y llenado de estos.

En los tratamientos de fertilización que se han comentado (500 y 1500kg/ha), se observa una redistribución marcada del nitrógeno, al inicio de la etapa de floración, presentándose una disminución del elemento en el factor hojas, hasta la siguiente semana de evaluación, donde, el contenido del elemento en sus diversos factores, incrementan, manteniéndose estable hasta la semana 12 (destrucción 6).

Para el tratamiento de 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20 sucede la misma situación que en los anteriores tratamientos, es decir, en las dos primeras semanas de evaluación en las destrucciones 5 y 6 no hay presencia de tubérculo, por lo cual no se evidencia nitrógeno en dicho órgano. Se observa en la semana de floración (destrucción 4), un punto crítico para la disminución de la concentración de N en las hojas, tallos y raíces, con un aumento en su

concentración en tubérculos. Posterior a floración la traslocación del nitrógeno desde la hoja y raíz, hacia los tubérculos es más evidente, acción que se hizo continúa hasta la octava medición, en donde sucedió, que a medida que disminuía el nitrógeno en las hojas, tallos y raíces, aumentaba en el tubérculo, tabla 56.

Tabla 55. Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento 1500 kg/ha fertilizante 10-20-20

Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento de 1500 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	N1(5)	Ps	Sd	N2(6)	Ps	Sd	N3(7)	Ps	Sd	N 4(8)
Hoja	7,655	0,326	0,529	11,278	0,469	0,704	30,635	0,374	1,550	27,385	0,160	1,465
Tallo	4,147	0,083	0,196	8,487	0,231	0,399	28,873	0,208	0,867	38,178	0,291	1,238
Raíz	3,022	0,021	0,098	4,683	0,083	0,149	12,323	0,079	0,339	16,233	0,016	0,369
Tubér.	0,000	0,000	0 + 0,001	0,000	0,000	0 + 0,001	6,041	0,081	0,155	23,979	0,135	0,527
Total	14,823	0,430	0,823	24,448	0,784	1,251	77,872	0,742	2,911	105,776	0,602	3,599
Delta	0,165		0,428			1,660			0,688			
Órgano	Ps	Sd	N5(9)	Ps	Sd	N6(10)	Ps	Sd	N7(12)	Ps	Sd	N8(14)
Hoja	45,277	0,605	2,230	47,892	0,470	2,478	34,777	0,558	1,706	30,305	0,809	1,460
Tallo	46,073	0,387	1,470	56,557	0,396	1,892	45,948	0,282	1,294	49,913	0,952	1,209
Raíz	15,390	0,095	0,320	22,330	0,124	0,482	9,210	0,043	0,199	12,827	0,182	0,255
Tubér.	49,072	0,588	0,883	66,813	0,158	1,065	124,877	0,779	2,674	241,028	1,258	4,216
Total	155,812	1,676	4,902	193,592	1,147	5,916	214,812	1,662	5,873	334,073	3,200	7,141
delta	1,303		1,014			-0,021			0,634			

Ps: Promedio de peso seco por órgano. Sd: Desviación estándar. $N_{X(Y)}$: Contenido de nitrógeno (g)/planta, en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. (Y): Semana de desarrollo del cultivo

Es importante resaltar que para los tres tratamientos el comportamiento del N fue similar durante todo el desarrollo del cultivo, presentando épocas críticas o de una acción marcada en la distribución de dicho elemento, tales como el inicio de la tuberización en la séptima semana de desarrollo, la floración, como punto de traslocación del ión hacia los tubérculos y finalmente las etapas finales del cultivo, (semanas 12 y 14), en donde se observa una disminución del nitrógeno en el factor hojas, tallos y raíces, asociado con el aumento del contenido de nitrógeno en tubérculos.

2.6.4.2. Fósforo

El fósforo es un elemento esencial de los componentes químicos de la planta, responde por la transferencia de energía en los procesos metabólicos, durante el periodo inicial del desarrollo de la planta, lo mismo que durante la tuberización. Se encuentra también en los ácidos nucleicos y es importante para la formación de semillas y el crecimiento de la raíz.

Para Villamil, 2005, el fósforo presenta la mayor asimilación, en el estado de máximo crecimiento, es además, capaz de alcanzar concentraciones de 0.8% alrededor de los 40 días después de la siembra y posteriormente se estabiliza en 0.5%. Dependiendo del rendimiento, un cultivo puede extraer alrededor de 60 kg de P_2O_5 /ha.

Tabla 56. Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento 3000 kg/ha fertilizante 10-20-20

Distribución de N en biomasa seca total. Tratamiento de 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	N1(5)	Ps	Sd	N2 (6)	Ps	Sd	N3(7)	Ps	Sd	N 4(8)
Hoja	5,668	0,099	0,417	12,275	0,363	0,895	33,152	0,198	1,594	32,257	0,661	1,562
Tallo	3,352	0,399	1,173	9,612	0,511	1,399	29,013	0,577	1,785	44,887	0,197	1,242
Raíz	2,253	0,050	0,332	4,322	0,104	0,338	14,213	0,147	0,428	18,425	0,185	0,282
Tubér.	0,000	0,000	0 + 0,001	0,105	0,000	0 + 0,001	2,043	0,037	0,063	16,276	0,198	0,391
Total	11,273	0,548	1,922	26,314	0,978	2,632	78,421	0,959	3,871	111,845	1,242	3,477
Delta	0,384		0,710			1,239			-0,394			
Órgano	Ps	Sd	N5(9)	Ps	Sd	N6(10)	Ps	Sd	N7(12)	Ps	Sd	N8(14)
Hoja	51,488	0,354	2,824	53,297	0,982	2,970	20,418	0,074	1,082	17,005	0,718	0,850
Tallo	55,243	0,573	0,983	64,492	1,200	0,901	38,093	0,294	0,451	40,150	0,522	0,894
Raíz	18,223	0,059	0,183	24,890	0,224	0,206	13,060	0,030	0,136	9,698	0,203	0,371
Tubér.	22,890	0,033	0,431	58,230	0,419	1,149	105,040	0,344	2,565	138,048	0,845	2,582
Total	147,845	1,020	4,421	200,908	2,824	5,226	176,612	0,742	4,234	204,902	2,288	4,697
Delta	0,944		0,805			-0,496			0,232			

Ps: Promedio de peso seco por órgano. Sd: Desviación estándar. $N_{X(Y)}$: Contenido de nitrógeno (g)/planta en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. (Y): Semana de desarrollo del cultivo

2.6.4.2.1. Fósforo presente en hojas

La distribución del fósforo en la materia seca de las hojas fue constante desde las primeras semanas del cultivo hasta las semanas 8, 9 y 10. A partir de este momento se observa una disminución pronunciada del contenido de fósforo en la biomasa seca, la cual es continua hasta las etapas finales de evaluación (semanas 12 y 14); lo anterior implica que el fósforo es un elemento necesario durante todo el desarrollo del cultivo, con extracciones constantes durante dicho proceso y con un marcado efecto en floración y en tuberización, figura 34.

No existen diferencias significativas en la distribución del fósforo en las hojas con respecto a los niveles de fertilización evaluados; sin embargo en forma similar al nitrógeno, en la medida en que el nivel de fertilización es mayor, la absorción de este elemento por parte de la planta es igualmente mayor.

2.6.4.2.1.1. Parámetros del modelo estadístico de la variable respuesta P presente en hojas.

La absorción del fósforo en el factor hojas está influenciada por el nivel de fertilización de las plantas, en este caso 1,500 y 3,000 kg/ha de fertilizante. En la figura 34, se observa, que con el tratamiento de 3,000 kg/ha de fertilizante, el contenido de fósforo presente en la biomasa seca de las hojas, es mucho mayor, con respecto a los demás niveles de fertilización. Se evidenció que las condiciones experimentales, sin hallar diferencias estadísticas con respecto al tratamiento de 1,500 y de 3,000 kg/ha de fertilizante, el contenido de fósforo presente en la materia seca durante todo el desarrollo del cultivo fue

un poco menor en el primer tratamiento (1500 kg/ha), con respecto al tratamiento de 3000 kg/ha. Ello se traduce en la capacidad que tiene la planta de absorber mayor cantidad de nutrientes en la medida en que estos sean disponibles o estén presentes en el suelo. De igual forma se observó el efecto del tiempo lineal y cuadrático en la formulación del modelo, con un ajuste del 72%, tabla 57.

Tabla 57. Parámetros del modelo de distribución de fósforo en factor hojas.

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-1,296352	0,172585	-7511.00	2,15e-10	***
B F2	0,014294	0,037692	0,379	0,7057	
B F3	-0,015760	0,037692	-0,418	0,6772	
tto F1500	0,240585	0,037692	6.383	2,10e-08	***
tto F3000	0,373745	0,37692	9.916	1,25e-14	***
s	0,040471	0,038200	1.059	0,2933	
s2	-0,004696	0,001996	-2.352	0,0217	*
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0,1306 on 65 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0,7428, Adjusted R-squared: 0,719					
F-statistic: 31,28 on 6 and 65 DF, p-value: < 2,2e-16					

2.6.4.2.2. Fósforo presente en tubérculos

El contenido de fósforo en la masa seca de los tubérculos presenta un comportamiento errático, figura 35, lo cual no define su distribución de acuerdo con los parámetros establecidos tanto para campo, como para el diseño estadístico. Para nitrógeno y fósforo en tubérculos, no existe un modelo lineal definido, posiblemente la expresión del crecimiento pueda ser evidenciada mediante modelos mucho más complejos.

2.6.4.2.3. Fósforo presente en masa seca total

El fósforo disponible en la biomasa seca total se mantiene constante durante todo el desarrollo del cultivo, por lo que no existen diferencias significativas en la distribución de dicho elemento en la biomasa seca de los tratamientos aplicados, figura 36.

En la medida en que se le suministra mayor dosis de fertilizante al cultivo, el nivel de extracción será mayor, al igual contenido del elemento en la planta, como se observa para el tratamiento de 1,500 y 3,000 kg/ha de fertilizante.

Se pudo observar que al inicio de las mediciones en campo (semana 5), se tienen parte de concentraciones bajas de fósforo, generándose un leve incremento del elemento en el tratamiento de 1,500 y 3,000 kg/ha de fertilizante 10-20-20, posterior a la semana de aporque.

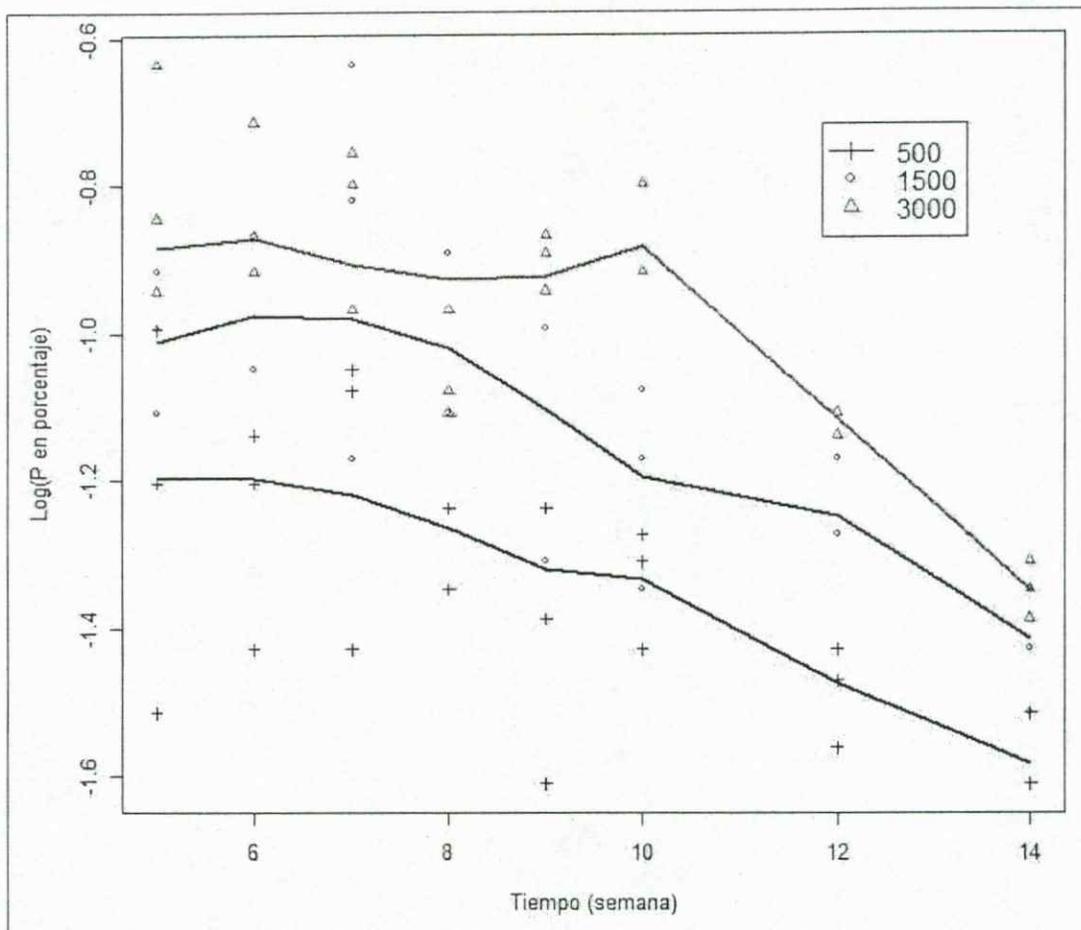


Figura 34. Concentración de P en masa seca de hojas, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.

En el tratamiento de 3,000kg/ha de fertilizante, se obtuvo el punto de máxima acumulación de fósforo en la semana 10, disminuyendo esta concentración vertiginosamente a partir de este momento y hasta la semana 14 de evaluación.

Para la dosis de 1,500kg/ha sucedió una situación similar, en el cual se obtuvo un punto de máxima acumulación del ión en la semana 8, punto a partir del cual se produce un descenso en la concentración del ión en la biomasa seca total de las plantas de papa, que termina en el aumento del fósforo en el factor tubérculo.

Finalmente para el tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante se obtuvo el punto de mayor concentración de fósforo, en la semana 9 manteniéndose constante hasta la semana 10 y descendido a partir de dicha semana, hasta la semana 14.

Es importante resaltar que los puntos de mayor concentración del P en los tres tratamientos de fertilización, se presentaron durante la etapa de floración, comprendida ente la octava, novena y parte de la décima semana de desarrollo del cultivo.

2.6.4.2.3.1. Parámetros del modelo estadístico variable respuesta P presente en masa seca total.

Los parámetros estadísticos útiles para el establecimiento del modelo de distribución del fósforo son: El intercepto, los tratamientos de 1500 y 3000 kg/ha de fertilizante y los factores tiempo lineal y cuadrático, obteniendo un ajuste con 67% de confianza y asumiendo un error experimental del 33%, tabla 58.

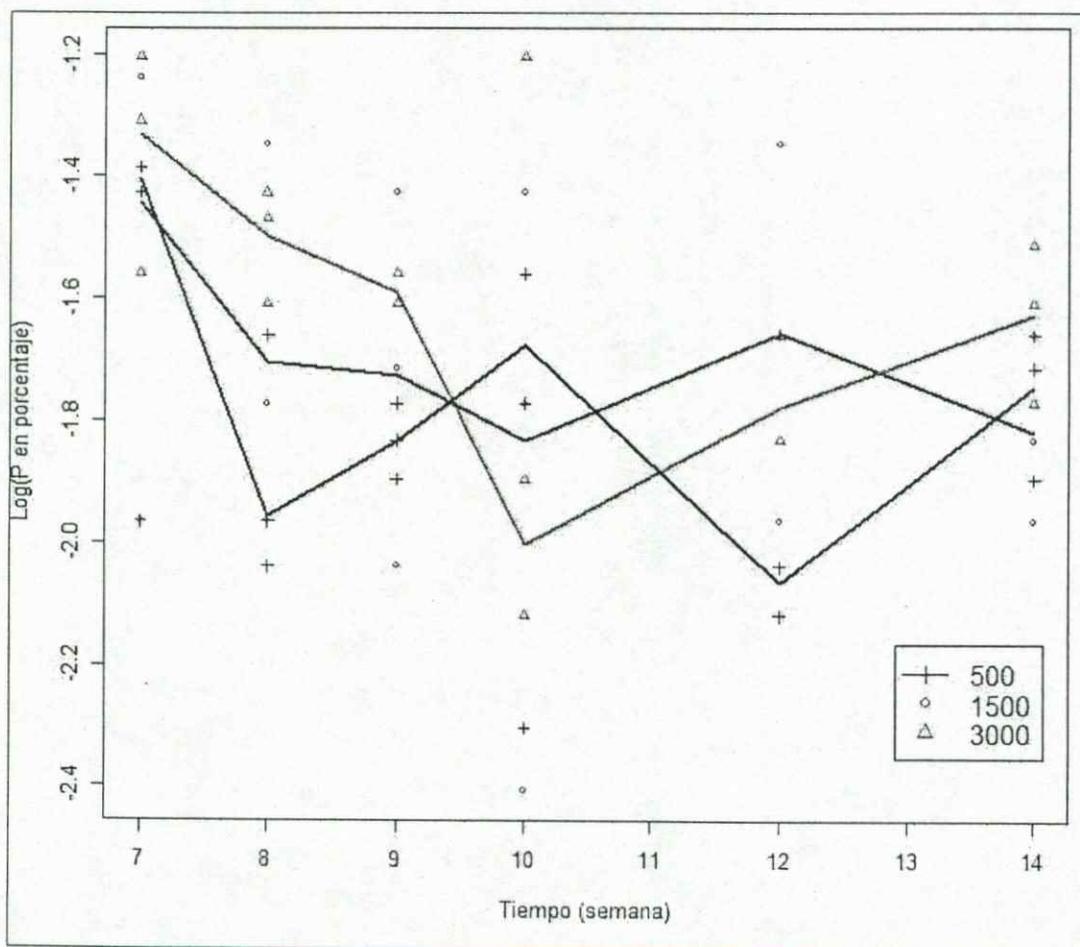


Figura 35. Concentración de P en tubérculos, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10-20-20.

Tabla 58. Parámetros de distribución de variable respuesta fósforo en masa total.

Coefficients	Estimate	Std,Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-1.032118	0,177400	-5.818	1,99e-07	***
B F2	0,032563	0,038743	0,840	0,404	
B F3	-0,013686	0,038743	-0,353	0,725	
tto F1500	0,214092	0,038743	5.526	6,21e-07	***
tto F3000	0,422859	0,038743	10.914	2,45e-16	***
s	0,179125	0,039265	4.562	2,30e-05	***
s ²	-0,010244	0,002052	-4.992	4,75e-06	***
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0,1342 on 65 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0,7015, Adjusted R-squared: 0,6739					
F-statistic: 25,46 on 6 and 65 DF, p-value: 2,515e-15					

2.6.4.2.4. Distribución de fósforo en la planta de papa

La distribución del fósforo en los diferentes órganos de la planta, en las tres dosis de fertilización ensayadas, durante todo el desarrollo del cultivo, se observan en las tablas 59, 60 y 61.

En la tabla 59, se presentan los resultados obtenidos con el tratamiento de 500 kg/ha. Se observa un incremento en la concentración de fósforo en la biomasa total de las plantas a medida que transcurren las semanas de evaluación, hasta llegar a la octava semana de desarrollo del cultivo (destrucción 4), donde el contenido total de P presente en la biomasa total de la planta disminuyó. A partir de la novena semana (destrucción 5), la concentración de fósforo en la biomasa total de las plantas continuó en aumento hasta la semana 14 (destrucción 8).

Durante todo el desarrollo del cultivo, hasta aproximadamente la décima semana, la mayor cantidad de fósforo se obtiene de las hojas de la planta, presentando un aumento progresivo hasta la medición 4. Gran parte del fósforo presente en las hojas, es transferido a los tallos y tubérculos, por lo cual se produce una disminución del elemento en dicho órgano, a partir de esta medición. En la destrucción 5 y 6 se mantiene el incremento del fósforo en todo los órganos de la planta, lo que es de esperarse debido al estado de desarrollo en que se estas se encuentran.

A partir de la semana 12 (séptima destrucción) se observa una disminución en el contenido del fósforo en los tallos y raíces, con un aumento significativo de dicho elemento los tubérculos, lo cual se hace mas evidente en la última semana de evaluación del cultivo, donde el contenido de fósforo en hojas, tallos y raíces se reduce a la mitad y casi se duplica para el factor tubérculo. Para el tratamiento de 500 kg/ ha de fertilizante aplicado se extrajo un total de 1,920 g de fósforo/planta en la biomasa seca de la planta.

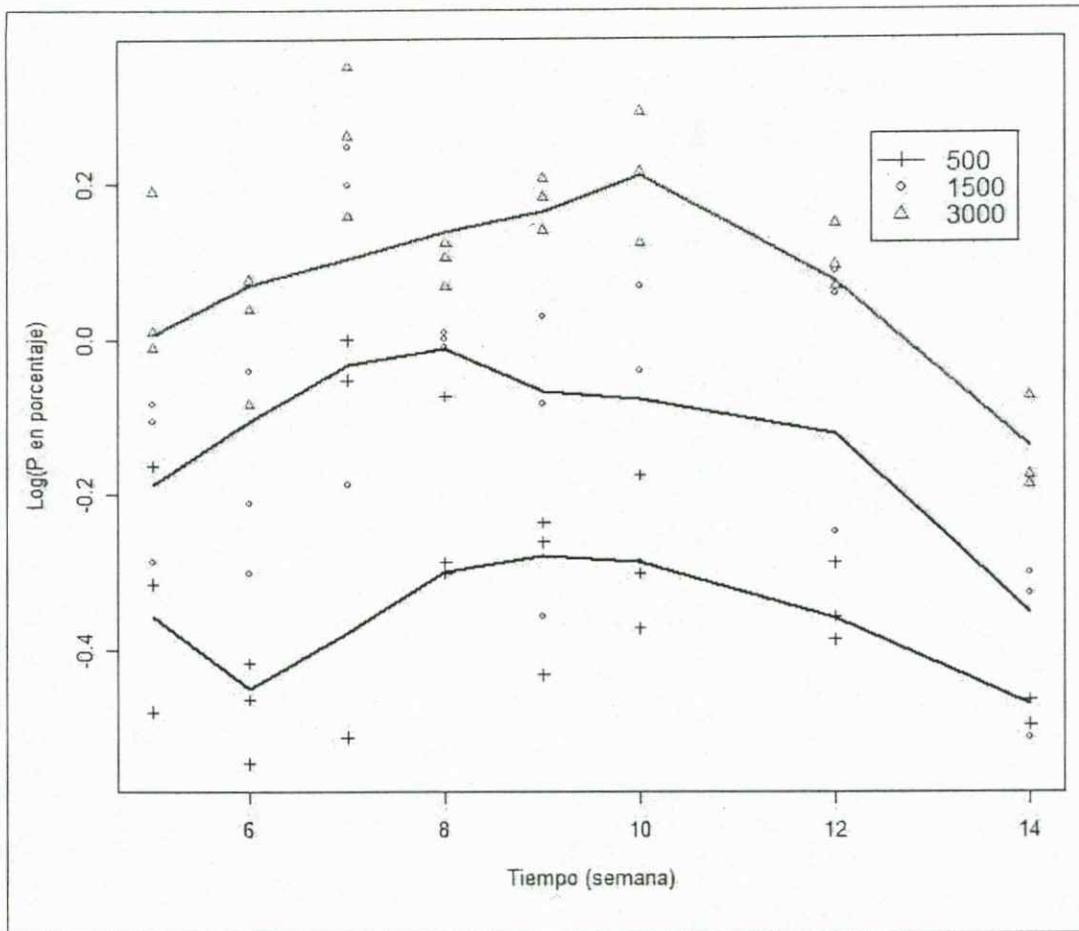


Figura 36. Concentración de P en masa seca total, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.

En la tabla 60, se registran los datos de la distribución del fósforo en el tratamiento de 1500 kg/ha. El comportamiento del P es similar al presentado en el tratamiento de 500 kg/ha.

En las primeras etapas del cultivo hay un aumento en el contenido del fósforo en hojas, tallos y raíces, hasta la séptima semana de evaluación (destrucción 3). En las dos primeras destrucciones no había presencia de tubérculos, por lo cual no se reporta concentraciones de fósforo.

En este tratamiento la semana de floración tuvo un marcado efecto en la distribución del P, como sucedió con el tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante. En esta semana se da una disminución en el contenido de fósforo en hojas, debido a su distribución para la formación de flores, formación de frutos y posible translocación hacia las raíces, tallos y tubérculos.

En la siguiente semana de evaluación (destrucción 5), se observó una disminución en el contenido de fósforo disponible en los tallos, raíces y un aumento de forma significativa en los tubérculos. Esta disminución en contenido del P en las hojas, tallos y raíces se ve fuertemente marcada en las destrucciones 7 y 8 (semanas 12 y 14), en las cuales se produce la traslocación del elemento desde las hojas, los tallos y las raíces, hacia los tubérculos. Para esta dosis de fertilización (500kg/ha), se extrajo un total de 2,504 g de fósforo /ha, a partir de la biomasa seca de la planta.

Con el tratamiento de 3,000 kg/ha de fertilizante 10-20-20, se observa que el fósforo comparte con las otras dosis de fertilización puntos críticos o de cambios en el comportamiento en la distribución del elemento en la planta, tabla 61.

Al inicio del ciclo productivo y hasta la tercera destrucción, se detecta un incremento continuo en la concentración de P en hojas; al llegar el tiempo de floración (destrucción 4) se presentó una leve disminución en la concentración de P en las hojas, aumentando de forma consecutiva su concentración en tallos, flores, raíces y tubérculos. En dicha medición y en los tallos, se obtuvo el punto de máxima concentración del elemento, 0,115 g.

En tallos, raíces y tubérculos, se evidencian tasas de concentración exponenciales del P desde las primeras etapas de desarrollo del cultivo, hasta el momento de floración, punto en el cual, la distribución de fósforo en las hojas disminuye, puesto que parte de esta se redistribuye hacia los tallos, flores, raíces y los tubérculos.

En la quinta y sexta destrucción (semanas 9 y 10), la tendencia de la distribución de P en los diferentes órganos evaluados, presentó una tendencia creciente, con una tasa de concentración mayor en tallos y raíces.

A partir de la séptima y la octava destrucción (semanas 12 y 14), se observa una acentuada caída en la concentración del elemento, en hojas, tallos y raíces, que se sustenta en el aumento en la concentración de P en la biomasa de los tubérculos. Ello implica que gran parte de la concentración del elemento está siendo utilizado en el desarrollo de los tubérculos. Es importante anotar que la acción realizada por la planta al transportar nutrientes, solo se lleva a cabo hasta el momento después de la floración (semana de 8 a la 10, destrucción 4, 5, 6).

Tabla 59. Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento 500 kg/ha fertilizante 10-20-20

Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	P1(5)	Ps	Sd	P2(6)	Ps	Sd	P3(7)	Ps	Sd)	P4(8)
Hoja	6,807	0,004	0,019	12,728	0,020	0,038	31,565	0,045	0,101	19,273	0,010	0,054
Tallo	3,513	0,006	0,015	9,850	0,006	0,015	24,490	0,020	0,042	27,668	0,014	0,053
Raíz	2,290	0,002	0,004	5,097	0,003	0,009	12,655	0,009	0,021	11,862	0,004	0,021
Tubér.	0,000	0,000	0,000	0,795	0,000	0,000	6,580	0,014	0,014	21,260	0,013	0,032
Total	12,610	0,012	0,038	28,470	0,029	0,062	75,290	0,087	0,179	80,064	0,041	0,161
Delta	0,008		0,024			0,117			-0,019			
Órgano	Ps	Sd	P5(9)	Ps	Sd	P6(10)	Ps	Sd	P7(12)	Ps	Sd	P8 (14)
Hoja	40,055	0,040	0,098	41,723	0,013	0,109	50,355	0,009	0,114	25,718	0,017	0,054
Tallo	37,177	0,025	0,064	47,033	0,025	0,081	46,387	0,014	0,072	30,505	0,007	0,033
Raíz	14,628	0,014	0,024	18,895	0,010	0,031	11,220	0,011	0,021	8,145	0,004	0,011
Tubér.	41,708	0,030	0,068	59,150	0,028	0,089	166,460	0,006	0,210	227,218	0,129	0,399
Total	133,568	0,108	0,254	166,802	0,076	0,311	274,422	0,041	0,419	291,587	0,158	0,497
Delta	40,055		0,040			0,098			41,723			

Ps: Promedio de peso seco por órgano. Sd: Desviación estándar. $P_{X(Y)}$: Contenido de P (g/planta), en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. (Y): Semana de desarrollo del cultivo

Tabla 60. Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento 1500 kg/ha de fertilizante 10-20-20

Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento de 1500 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	P1(5)	Ps	Sd	P2(6)	Ps	Sd	P3(7)	Ps	Sd)	P4(8)
Hoja	7,655	0,017	0,028	11,278	0,027	0,040	30,635	0,055	0,135	27,385	0,033	0,111
Tallo	4,147	0,007	0,012	8,487	0,012	0,019	28,873	0,024	0,072	38,178	0,014	0,093
Raíz	3,022	0,002	0,006	4,683	0,007	0,010	12,323	0,008	0,025	16,233	0,008	0,033
Tubér.	0,000	0,000	0,000	0,457	0,000	0,000	6,041	0,006	0,013	23,979	0,020	0,047
Total	14,823	0,026	0,047	24,906	0,045	0,070	77,872	0,093	0,244	105,776	0,075	0,284
Delta	0,009		0,023			0,174			0,040			
Órgano	Ps	Sd	P5(9)	Ps	Sd	P6(10)	Ps	Sd	P7(12)	Ps	Sd	P8(14)
Hoja	45,277	0,010	0,210	47,892	0,081	0,223	34,777	0,008	0,067	30,305	0,035	0,044
Tallo	46,073	0,023	0,078	56,557	0,033	0,146	45,948	0,024	0,093	49,913	0,032	0,062
Raíz	15,390	0,006	0,029	22,330	0,012	0,044	9,210	0,005	0,024	12,827	0,007	0,019
Tubér.	49,072	0,026	0,079	66,813	0,014	0,095	124,877	0,080	0,246	241,028	0,156	0,399
Total	155,812	0,064	0,397	193,592	0,140	0,508	214,812	0,117	0,430	334,073	0,229	0,524
Delta	0,113		0,111			-0,039			0,047			

Ps: Promedio de peso seco por órgano. Sd: Desviación estándar. $P_{X(Y)}$: Contenido de P (g/planta) en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. (Y): Semana de desarrollo del cultivo

Tabla 61. Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20

Distribución de P en biomasa seca total. Tratamiento de 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	P1(5)	Ps	Sd	P2(6)	Ps	Sd	P3(7)	Ps	Sd	P4(8)
Hoja	5,668	0,009	0,026	12,275	0,023	0,054	33,152	0,029	0,144	32,257	0,033	0,111
Tallo	3,352	0,005	0,013	9,612	0,014	0,029	29,013	0,024	0,100	44,887	0,037	0,115
Raíz	2,253	0,001	0,006	4,322	0,004	0,012	14,213	0,012	0,038	18,425	0,009	0,051
Tubér.	0,000	0,000	0,000	0,105	0,000	0,000	2,043	0,001	0,005	16,276	0,015	0,036
Total	11,273	0,014	0,044	26,314	0,040	0,096	78,421	0,067	0,286	111,845	0,094	0,313
Delta	0,009		0,052			0,191			0,026			
Órgano	Ps	Sd	P5(9)	Ps	Sd	P6(10)	Ps	Sd	P7(12)	Ps	Sd	P8(14)
Hoja	51,488	0,034	0,210	53,297	0,081	0,223	20,418	0,008	0,067	17,005	0,035	0,044
Tallo	55,243	0,021	0,177	64,492	0,058	0,215	38,093	0,049	0,093	40,150	0,054	0,084
Raíz	18,223	0,006	0,048	24,890	0,011	0,072	13,060	0,013	0,049	9,698	0,009	0,019
Tubér.	22,890	0,015	0,047	58,230	0,020	0,091	105,040	0,046	0,180	138,048	0,088	0,264
Total	147,845	0,075	0,481	200,908	0,170	0,601	176,612	0,115	0,389	204,902	0,185	0,412
Delta	0,168		0,120			-0,106			0,012			

Ps: Promedio de peso seco por órgano. Sd: Desviación estándar. $P_{X(Y)}$: Contenido de P (g/planta), en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. (Y): Semana de desarrollo del cultivo

2.6.4.3. Potasio

El potasio es asimilado en grandes cantidades por la planta de papa y una insuficiencia del mismo acorta el periodo vegetativo, en detrimento del rendimiento. La planta de papa, unas cuantas semanas después de la emergencia, asimila ávidamente el potasio y disminuye sensiblemente la asimilación, después de alcanzar la época de máximo follaje, por tal razón en periodo relativamente corto, la planta tiene a su disposición una buena cantidad de potasio, Guerrero, 1998.

2.6.4.3.1. Potasio presente en hojas

El porcentaje de potasio presente en la materia seca de las hojas, es mayor, en las primeras semanas de desarrollo del cultivo, disminuyendo paulatinamente a partir de la octava semana; situación más evidente en la etapas finales de la evaluación del cultivo, figura 37. La menor concentración del potasio se observa en el tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante, la disminución es menos acentuada para los tratamientos de 1500 y 3000 kg/ha.

En las primeras etapas de desarrollo, las plantas tienen ciertas concentraciones de potasio en las hojas, que disminuyen en función del crecimiento de las plantas y los procesos de translocación asociados a la demanda de K por otros órganos de la planta. Esta situación explica el decrecimiento en el contenido de potasio en hojas a partir de la octava semana de desarrollo del cultivo. Otra explicación a esta disminución observada a partir de la semana 8, es la dilución del elemento en las hojas, debido a que la biomasa de hojas se ha

incrementado, es decir la tasa de incremento de biomasa supera la tasa de absorción de K, por lo cual su concentración relativa disminuye.

2.6.4.3.1.1. Parámetros del modelo estadístico de la variable respuesta K en masa seca de hojas

En los parámetros estadísticos evaluados, se resalta el efecto del intercepto y de la interacción del los niveles del tratamiento con el tiempo lineal; obteniendo un ajuste del 72% para la distribución del potasio en masa seca de las hojas, tabla 62.

La interacción de los niveles de fertilización de 1500 y 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20, con el tiempo lineal, hace referencia a que hay un efecto positivo en la distribución del potasio, para tales tratamientos, en la medida que transcurren las semanas de desarrollo del cultivo, es decir, hay disponibilidad del elemento a medida que la planta crece, lo cual no es evidente para el tratamiento de 500 kg kg/ha, puesto que este disminuye a medida que la planta crece y se desarrolla.

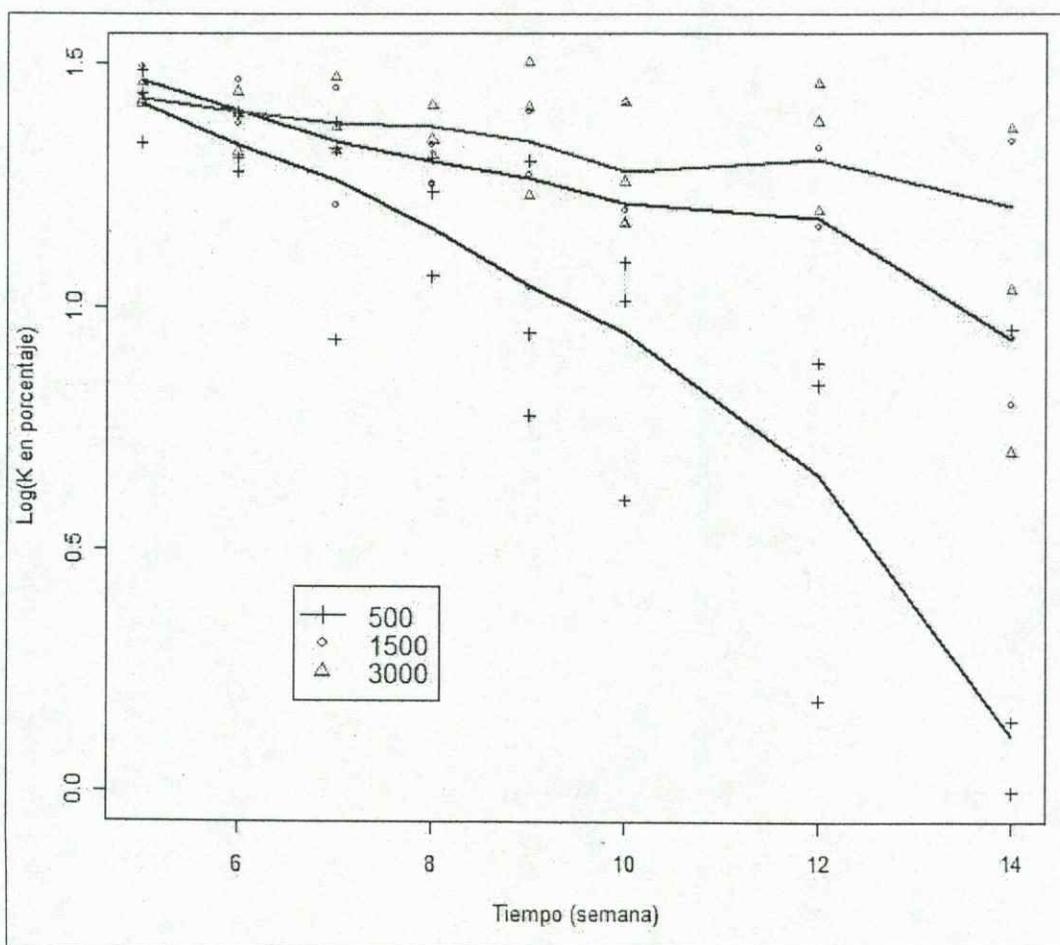


Figura 37. Concentración de K en de las hojas, con tres niveles de aplicación de un fertilizante grado 10- 20-20.

2.6.4.3.2. Potasio presente en tubérculos

La figura 38, indica los contenidos de potasio en los tubérculos. En las semanas 7 y 8 después de siembra, el contenido de K es mayor que en las últimas semanas de evaluación (semana 12 y 14), y además es constante durante toda su distribución, en tales semanas (7 y 8), fenómeno asociado al proceso de dilución ya mencionado.

Tabla 62. Parámetros del modelo de de variable respuesta de potasio en hojas.

Coefficients	Estimate	Std,Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1,999238	0,112526	17.767	< 2e-16	***
B F2	-0,003931	0,047174	-0,083	0,933845	
B F3	0,165085	0,047174	3,499	0,000854	***
tto F1500	-0,423276	0,154404	-2741	0,007923	**
tto F3000	-0,424700	0,154404	-2751	0,007727	**
s	-0,117450	0,011714	-10,027	9,50e-15	***
tto F1500:s	0,078642	0,016566	4,747	1,20e-05	***
tto F3000:s	0,083430	0,016566	5,036	4,13e-06	***
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0,1634 on 64 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0,7477, Adjusted R-squared: 0,7201					
F-statistic: 27,09 on 7 and 64 DF, p-value: < 2,2e-16					

A partir de la octava semana de desarrollo del cultivo, en el punto de inicio de floración se observa una fuerte caída del contenido de potasio en los tubérculos, lo cual puede estar asociado al hecho de que, en la etapa de floración, la energía metabólica que requiere la planta para realizar su fase reproductiva es muy alta, por lo que la translocación de dicho elemento a partir de los demás órganos de la planta, hacia los tubérculos, puede verse disminuida, como se observa de la semana 8 a la semana 10.

Desde el inicio de la semana 10, se observa un incremento en la concentración de potasio para los tratamientos de 1500 y 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20, con un pico de acumulación en la semana doce de desarrollo de las plantas. Esto obedece a que después de la etapa de floración, la planta frena gran parte de la distribución de los nutrientes para el crecimiento aéreo y radical de la misma, para translocarlos hacia los tubérculos, por lo cual el contenido de potasio es mayor en los tubérculos, en la semana 12, debido al aporte nutricional del suelo y translocación de fotoasimilados con posible arrastre de K.

Finalmente en las últimas etapas de evaluación (semanas 12 y 14), se observa nuevamente una caída en los contenidos de potasio de los tubérculos, lo cual evidencia la entrada de la etapa de senescencia de la planta, o el deterioro de raíces que disminuye su absorción desde el suelo o bien por el proceso de dilución.

2.6.4.3.2.1. Parámetros del modelo potasio en masa seca de tubérculos

Los parámetros estadísticos determinantes para la evaluación del modelo de distribución de potasio en los tubérculos, presentan dificultades para ser evaluados bajo las condiciones de modelos lineales, puesto que no denotan significancia estadística, de acuerdo con las condiciones planteadas en campo, tabla 63. El modelo para la distribución del potasio, bajo las condiciones experimentales planteadas, ajusta al 23% de confianza, lo cual implica que se requiere establecer modelos de distribución de asimilados más complejos, que puedan determinar de forma adecuada el comportamiento de la distribución del potasio en los tubérculos en un momento deseado.

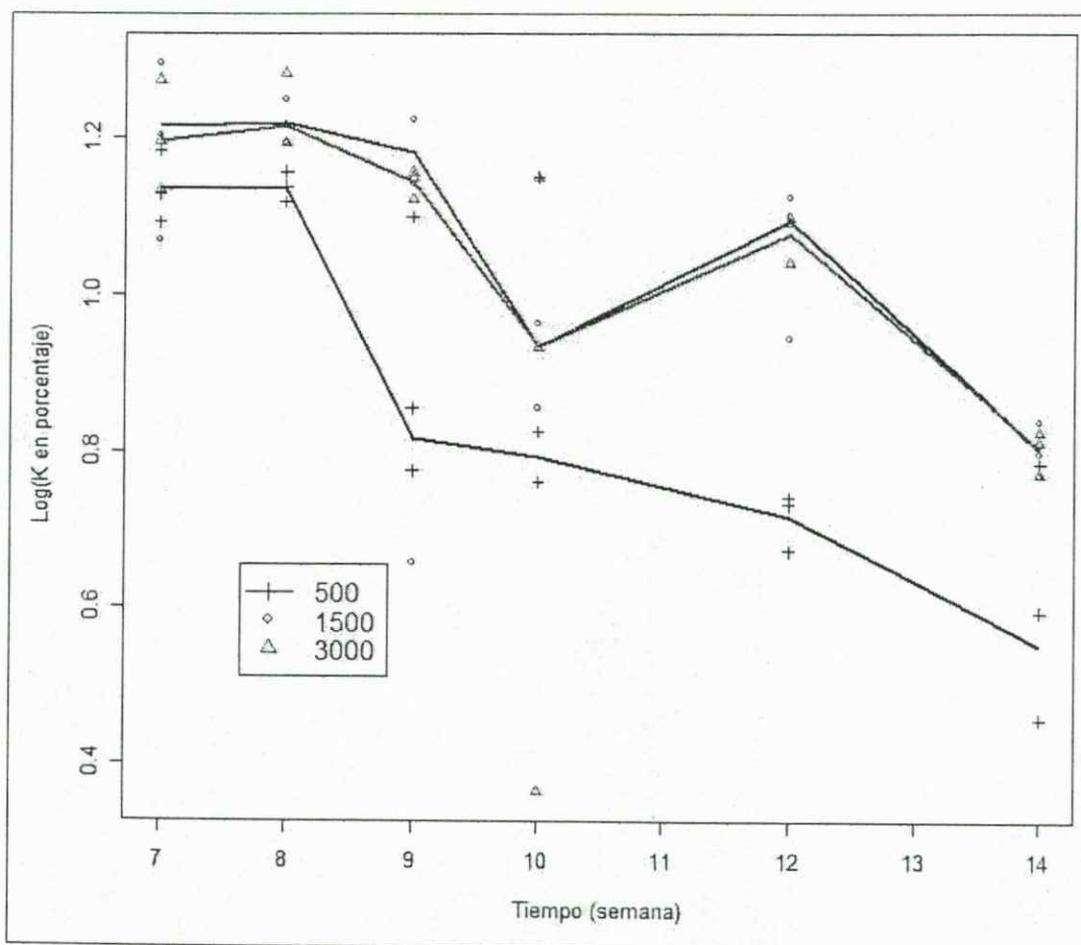


Figura 38. Concentración de K en tubérculos con tres niveles de un fertilizante grado 10-20-20.

Tabla 63 Parámetros de distribución de la variable respuesta de potasio en tubérculos

Coefficientes	Estimate	Std,Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1,852597	0,191483	9,675	1,15E-12	***
B F(19:72)2	-0,018205	0,076658	-0,237	0,81333	
B F(19:72)3	-0,035733	0,074320	-0,481	0,63294	**
tto F(19:72)1500	-0,886028	0,302036	-2,934	0,00521	
tto F(19:72)3000	-0,101586	0,223195	-0,455	0,65115	
s(19:72)	0,007747	0,019163	0,404	0,68790	**
tto F(19:72)1500:s(19:72)	0,061868	0,030423	2,034	0,04779	
tto F(19:72)3000:s(19:72)	0,011195	0,024150	0,464	0,64514	***
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0,2124 on 46 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0,334, Adjusted R-squared: 0,2327					
F-statistic: 3,296 on 7 and 46 DF, p-value: 0,006338					

2.6.4.3.3. Potasio presente en la masa seca total

El porcentaje de potasio observado en la biomasa seca total, presenta una distribución similar a la obtenida en hojas y tubérculos, en donde se tiene un contenido de potasio constante en la planta desde el inicio del cultivo, hasta la octava semana de desarrollo, con efecto marcado de la floración, hasta la semana 10; puesto que la concentración de potasio disminuye de forma considerable, figura 39.

De la semana 10, hasta la semana 14 se observa en los tratamientos de 1,500 y 3,000kg/ha de fertilizante 10-20-20, un aumento en la concentración de potasio en las plantas, fenómeno que no sucede con el tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante; en este último la concentración es menor en la medida en que las plantas crecen, posiblemente con dicho tratamiento no se esté supliendo las necesidades básicas de K para la planta de papa.

2.6.4.3.3.1. Parámetros del modelo potasio en la masa seca total

Para los tratamientos de 1,500 y 3,000 kg/ha de fertilizante, no existen diferencias estadísticamente significativas en la distribución del potasio en la planta, por lo que se optaría por aplicaciones de 1,500 kg/ha, con el fin de optimizar los costos de producción del cultivo.

Los parámetros que definen el modelo de distribución de potasio en la planta son: el intercepto, el tiempo lineal y el tiempo cuadrático; las dosis de fertilizante de 1,500 y 3,000 presentan, significancia estadística, pero sin embargo los parámetros que determinan el modelo no son lo suficientemente claros para definir el comportamiento de distribución del

potasio en la planta. El ajuste del modelo es muy bajo y se asume un error atribuido al diseño experimental muy alto, en este caso el ajuste es del 40% y el error del 60%, tabla 64. Para poder explicar la distribución del potasio, es necesario, establecer modelos más complejos; como es el caso del potasio distribuido en la biomasa del tubérculo.

La distribución del potasio en la planta para el tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20, tabla 65, en la quinta y sexta semana de desarrollo del cultivo (destrucciones 1 y 2), se determinó en las hojas, tallos y raíces; al no haber presencia de tubérculos en tales semanas, es evidente que no se observa una distribución del potasio para dicho elemento. De la quinta a la sexta semana del cultivo la concentración del ión aumenta hasta el punto de duplicar su valor para los órganos anteriormente nombrados.

En la semana siete la concentración de potasio continúa aumentando en hojas, tallos y raíces, se evidencia también la presencia de potasio en los primeros tubérculos formados.

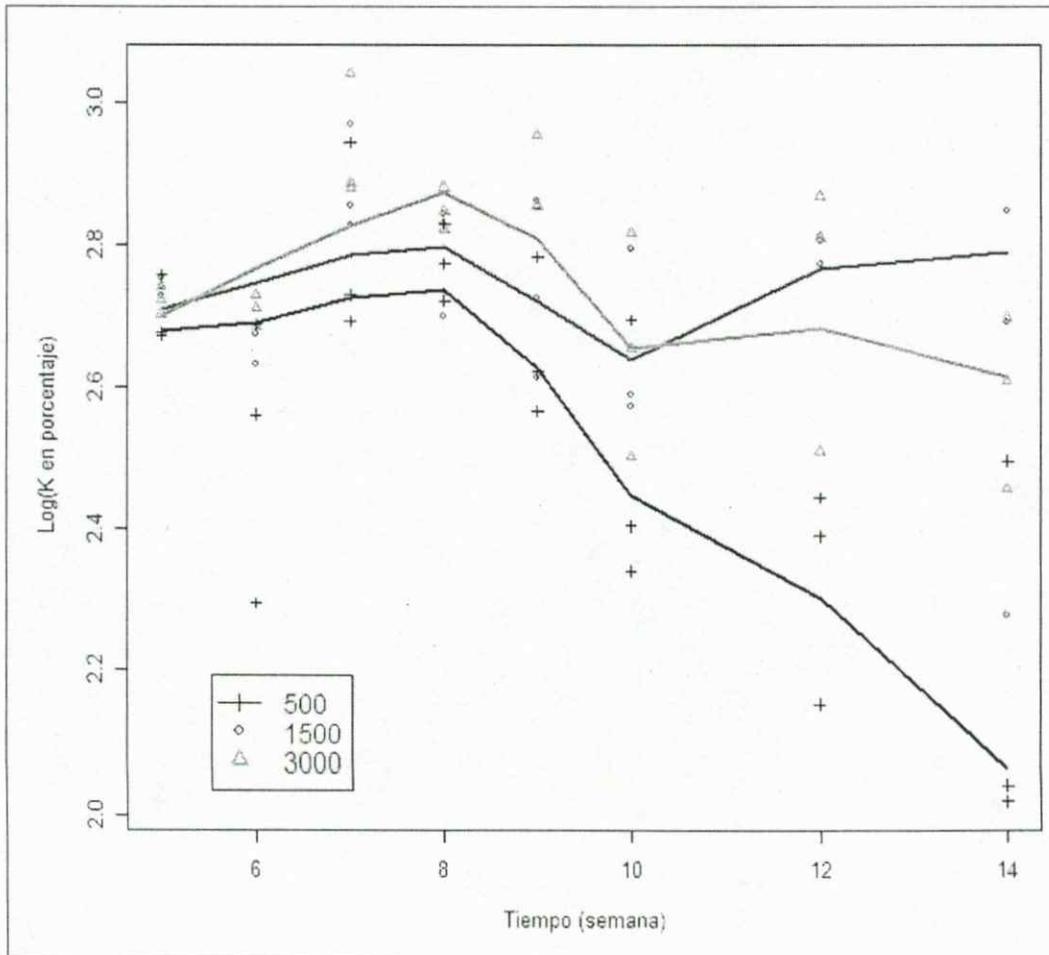


Figura 39. Concentración de K en masa seca total con tres niveles de fertilizante grado 10-20-20.

Tabla 64. Parámetros de distribución de la variable respuesta potasio en masa Total

Coefficientes	Estimate	Std,Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	2,233071	0,206081	10,836	3,32E-16	***
B F2	-0,036787	0,045007	-0,817	0,416714	
B F3	0,003925	0,045007	0,087	0,930768	
tto F1500	0,179358	0,045007	3,985	0,000173	***
tto F3000	0,205660	0,045007	4,570	2,24E-05	***
s	0,108390	0,002384	-12,342	<2e-16	*
s ²	-0,007243	0,002384	-3,039	0,003422	**
Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residual standard error: 0,1559 on 65 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0,4579 Adjusted R-squared: 0,4079					
F-statistic: 9,151 on 6 and 66 DF, p-value: 2,959e-07					

En la semana de inicio de floración (semana 8), se observa una considerable disminución de la concentración del potasio en hojas. En tallos y raíces tal disminución es menos acentuada y para tubérculos se comienza a detectar un incremento exponencial, en la concentración del ión a partir de la octava hasta la semana doce.

La fuerte disminución de las concentraciones de potasio en hojas, en la semana de floración implica que la mayoría de la energía metabólica que se está usando en la floración, está siendo obtenida en su mayoría de las hojas. El K es esencial en la regulación osmótica, implicada en la apertura de los botones florales.

En la semana 9 (destrucción 5), se presenta una distribución de los asimilados de la planta, posterior al periodo de floración, con lo que se evidencia un aumento en la concentración de potasio en hojas, tallos y tubérculos, disminuyendo en raíces.

Para la semana 10 (destrucción 6) se observa la translocación del potasio, hacia las raíces y los tubérculos, presentándose una disminución en su concentración en hojas y tallos, y un aumento para raíces y tubérculos.

Este efecto es mucho más claro en las semanas 12 y 14 de desarrollo del cultivo (destrucción 7 y 8), en las cuales, el contenido de potasio en las hojas disminuye considerablemente, lo que no sucede de forma inmediata en tallos, puesto que, aunque para la semana 12 se observa una disminución en la concentración del potasio de los tallos esta no es muy fuerte, por lo que posiblemente gran parte del potasio presente en las hojas está siendo llevado a los demás órganos de la planta, es decir, están siendo translocado. El contenido máximo de potasio en los tubérculos se observa en la semana 12, (3,409g), el cual disminuye al llegar a la semana 14.

En la determinación de la distribución del potasio para el tratamiento de 1,500 kg/ha, tabla 66, se observa que el ión aumenta de forma exponencial en la totalidad de la planta durante todo su estado de desarrollo.

Tabla 65. Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento 500 kg/ha fertilizante 10-20-20.

Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	K1(5)	Ps	Sd	K2(6)	Ps	Sd	K3(7)	Ps	Sd	K4(8)
Hoja	6,807	0,115	0,276	12,728	0,205	0,483	31,565	0,244	1,049	19,273	0,018	0,636
Tallo	3,513	0,082	0,250	9,850	0,349	0,595	24,490	0,502	1,683	27,668	0,023	1,792
Raíz	2,290	0,042	0,084	5,097	0,062	0,155	12,655	0,136	0,382	11,862	0,074	0,371
Tubér.	0,000	0,000	0,000	0,795	0,000	0,000	6,580	0,145	0,200	21,260	0,308	0,663
Total	12,610	0,240	0,610	28,470	0,616	1,233	75,290	1,028	3,314	80,064	0,422	3,463
Delta	0,122		0,623			2,081			0,149			
Órgano	Ps	Sd	K5(9)	Ps	Sd	K6(10)	Ps	Sd	K7(12)	Ps	Sd	K8(14)
Hoja	40,055	0,188	1,062	41,723	0,228	1,039	50,355	0,325	0,996	25,718	0,270	0,414
Tallo	37,177	0,869	2,523	47,033	0,458	2,380	46,387	0,853	2,328	30,505	0,375	1,403
Raíz	14,628	0,106	0,312	18,895	0,009	0,348	11,220	0,033	0,151	8,145	0,011	0,077
Tubér.	41,708	0,247	1,000	59,150	0,244	1,423	166,460	0,327	3,409	227,218	0,871	0,631
Total	133,568	1,410	4,898	166,802	0,940	5,190	274,422	1,539	6,884	291,587	1,528	2,526
Delta	1,434		0,293			0,847			-2,179			

Ps: Promedio de peso seco por órgano. Sd: Desviación estándar. $K_{X(Y)}$: Contenido de K (g/planta) en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. (Y): Semana de desarrollo del cultivo

Tabla 66. Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento 1500 kg/ha fertilizante 10-20-20

Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento de 1500 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	K1(5)	Ps	Sd	K2(6)	Ps	Sd	K3(7)	Ps	Sd	K4(8)
Hoja	7,655	0,197	0,331	11,278	0,314	0,461	30,635	0,267	1,155	27,385	0,188	0,984
Tallo	4,147	0,141	0,304	8,487	0,437	0,624	28,873	0,670	2,274	38,178	0,317	2,557
Raíz	3,022	0,030	0,115	4,683	0,096	0,142	12,323	0,072	0,371	16,233	0,151	0,428
Tubér.	0,000	0,000	0,000	0,457	0,000	0,000	6,041	0,101	0,196	23,979	0,163	0,814
Total	14,823	0,368	0,751	24,906	0,847	1,227	77,872	1,111	3,996	105,776	0,820	4,782
Delta	0,150		0,476			2,769			0,787			
Órgano	Ps	Sd	K5(9)	Ps	Sd	K6(10)	Ps	Sd	K7(12)	Ps	Sd	K8(14)
Hoja	45,277	0,376	1,555	47,892	0,128	1,676	34,777	0,334	1,254	30,305	0,807	0,958
Tallo	46,073	0,750	3,175	56,557	0,187	3,395	45,948	0,299	3,377	49,913	2,259	3,505
Raíz	15,390	0,023	0,331	22,330	0,052	0,452	9,210	0,062	0,238	12,827	0,204	0,263
Tubér.	49,072	0,434	1,237	66,813	0,774	1,653	124,877	0,851	3,631	241,028	1,396	5,365
Total	155,812	1,583	6,298	193,592	1,143	7,176	214,812	1,545	8,500	334,073	4,667	10,091
Delta	1,516		0,878			0,662			0,795			

Ps: Promedio de peso seco por órgano. Sd: Desviación estándar. $K_{X(Y)}$: Contenido de K (g/planta) en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. (Y): Semana de desarrollo del cultivo.

El contenido de potasio en las hojas de la primera destrucción, hasta la tercera destrucción crece. Al llegar a la cuarta destrucción (semana 8), se disminuye el contenido de potasio presente en las hojas, pero continua en aumento para tallos, raíces y tubérculos; lo cual implica que las hojas aportan una parte importante de su contenido de K en la floración, por lo que la cantidad de potasio se ve reducido en dicho órgano y en esta etapa de desarrollo, como sucedió de forma similar con el tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante.

El la quinta destrucción (semana 9), se observa un nuevo incremento en el contenido de potasio para hojas, tallos y tubérculos, disminuyendo para el factor raíz. La siguiente semana la concentración del ión en todos los órganos de la planta , se mantienen en aumento, hasta llegar las dos últimas semanas de evaluación, donde gran parte del potasio presente en hojas es distribuido hacia los tallos, raíces y en tubérculos, hasta llegar al reservorio final, de la translocación de los elementos, es decir, el tubérculo.

Finalmente en la tabla 67 se observa que para el tratamiento de 3,000 kg/ha de fertilizante, el contenido de potasio es creciente hasta la décima semana de evaluación y a partir de esta empieza a disminuir , posiblemente debido a fenómenos de dilución del ión , es decir, las plantas tratadas con esta dosis de fertilización eran mucho mas vigorosas que las de los demás tratamientos, por lo que posiblemente en la semana doce de desarrollo del cultivo (destrucción 7), el contenido de potasio presente en la planta debía distribuirse en mayor masa de tejidos, por lo cual su concentración se disminuye, puede haber una menor tasa de absorción de nutrientes del suelo, por deterioro de las raíces o de las condiciones de absorción del ión. .

Tabla 67. Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento 3000 kg/ha fertilizante 10-20-20.

Distribución de K en biomasa seca total. Tratamiento de 3000 kg/ha de fertilizante 10-20-20												
Órgano	Ps	Sd	K1(5)	Ps	Sd	K2(6)	Ps	Sd	K3(7)	Ps	Sd	K4(8)
Hoja	5,668	0,051	0,237	12,275	0,168	0,484	33,152	0,190	1,324	32,257	0,403	1,240
Tallo	3,352	0,056	0,243	9,612	0,266	0,720	29,013	0,154	2,277	44,887	0,919	2,996
Raíz	2,253	0,018	0,084	4,322	0,029	0,151	14,213	0,116	0,503	18,425	0,162	0,630
Tubér.	0,000	0,000	0,000	0,105	0,000	0,000	2,043	0,027	0,067	16,276	0,246	0,558
Total	11,273	0,125	0,565	26,314	0,463	1,354	78,421	0,487	4,171	111,845	1,731	5,424
Delta	0,113		0,790				2,817		1,253			
Órgano	Ps	Sd	K5(9)	Ps	Sd	K6(10)	Ps	Sd	K7(12)	Ps	Sd	K8(14)
Hoja	51,488	0,522	2,079	53,297	0,539	1,886	20,418	0,164	0,792	17,005	0,383	0,502
Tallo	55,243	0,317	4,639	64,492	1,233	3,879	38,093	1,696	2,575	40,150	1,998	2,757
Raíz	18,223	0,169	0,444	24,890	0,045	0,568	13,060	0,132	0,306	9,698	0,153	0,201
Tubér.	22,890	0,239	0,721	58,230	0,917	1,327	105,040	0,533	3,083	138,048	1,200	3,073
Total	147,845	1,247	7,883	200,908	2,734	7,659	176,612	2,525	6,755	204,902	3,735	6,533
Delta	2,458		-0,224				-0,452		-0,111			

Ps: Promedio de peso seco por órgano. Sd: Desviación estándar. $K_{X(Y)}$: Contenido de K (g/planta) en las diferentes evaluaciones, donde X= destrucción 1,2,3,4,5,6,7,8. (Y): Semana de desarrollo del cultivo

El contenido de potasio en las hojas es creciente durante las primeras tres semanas de evaluación (destrucción 1, 2, 3), e igualmente sucedió para tallos y raíces. En la semana 7 (destrucción 3), sucedió que tanto para hojas, raíces y tallos, el incremento fue casi el doble de la semana anterior, y se observaron las primeras concentraciones del ión en tubérculos.

Llegada la semana de floración, (semana 8, destrucción 4), se presenta una disminución en la concentración de potasio en las hojas, y consecuentemente se observa un aumento en la concentración del ión para tallos, raíces y tubérculos. Este comportamiento se mantiene hasta la quinta destrucción, con excepción de la raíz, el cual disminuye para translocar potasio hacia los tubérculos.

A partir de la sexta evaluación del cultivo (semanas 10, 12 y 14), empieza a disminuir la concentración de potasio para los factores hojas, tallos, raíces y tubérculos, lo que implica que hay una alta demanda del elemento en la planta durante este periodo de tiempo específico. Ello nos lleva nuevamente a pensar en el efecto de dilución, previamente mencionado, por lo cual el potasio disminuye su contenido en un órgano específico.

2.6.4.3.4. Modelos de distribución de iones en la planta de papa, con tres niveles de fertilización 10-20-20

Los modelos de distribución de nutrientes, tabla 68, que mejor ajustaron fueron fósforo y potasio para hojas y nitrógeno y fósforo para masa seca total. Esto quiere decir que para las variables que presentaron un ajuste significativo, existe un modelo que las define en todo su estado de crecimiento y además, pueden ser evaluadas en campo bajo las condiciones experimentales planteadas en este estudio.

Para aquellas variables que no presentaron un ajuste significativo, se debe establecer modelos de distribución más complejos que definan el comportamiento del ión durante todas las etapas de desarrollo del cultivo.

Tabla 68. Modelos de distribución de iones en la planta de papa, con tres niveles de fertilización 10-20-20

Órgano	Iones	Modelo	R-squared ajustado	P_ value del modelo
Tubérculo	K	$Y = \text{Par} + 0,007747s + 0,061868 \text{ tto} * s$	0,2327	0,006338
Hojas	N	$Y = \text{Par} + 0,15388\text{tto} - 0,125981s + 0,004887s^2$	0,4354	6,97E-05
	P	$Y = \text{Par} + 0,373745\text{tto} - 0,040471s - 0,004696s^2$	0,719	2,20E-16
	K	$Y = \text{Par} - 0,117450s + 0,083430 \text{ tto} * s$	0,7201	2,20E-16
Masa total	N	$Y = \text{Par} + 0,170556 \text{ tto} - 0,040712s$	0,7451	2,20E-16
	P	$Y = \text{Par} + 0,422859\text{tto} + 0,179125s - 0,010244s^2$	0,6739	2,52E-15
	K	$Y = \text{Par} + 0,205660\text{tto} + 0,108390s - 0,007243s^2$	0,4079	2,96E-07

2.6.4.4. Conclusiones

La producción de biomasa seca no presentó diferencias significativas para los distintos tratamientos (500, 1,500, 3,000). Tales diferencias se hacen evidentes en la producción total de kilogramo de tubérculos por parcela.

El modelo propuesto para masa seca total al estar ajustado de forma significativa (83%) define la producción a lo largo de las etapas fenológicas del cultivo; apoyado por el ajuste de los modelos obtenidos en cada órgano.

El contenido de NPK en la planta es mayor en las primeras etapas del cultivo, disminuyéndose considerablemente en la época de floración, por lo cual esta se convierte en un punto crítico para la distribución de asimilados en la planta.

El tratamiento de 500 kg/ha de fertilizante no presenta una respuesta significativa para el ión potasio, por lo cual es recomendable no realizar aplicaciones de dicho elemento en la siembra y realizarlo en el aporque.

Las dosis de NPK que evidenciaron mejores resultados en la producción de masa seca fueron 1,500 y 3,000 kg de fertilizante/ha. Dichas aplicaciones no presentaron diferencias significativas en la producción de masa seca durante el periodo de desarrollo del cultivo.

2.7. Modelo de crecimiento del papa basado en grados día

2.7.1. Introducción

La temperatura un factor determinante del crecimiento de las plantas, que requieren de la acumulación de cierta cantidad de calor para pasar de un estado fonológico a otro. Esta acumulación de calor, constituye la energía necesaria para cumplir su ciclo ontogénico y se expresa, mediante distintos procedimientos, como unidades térmicas o grados-día.

La acumulación residual de grados-día considera para su determinación, la temperatura base bajo la cual la planta no se desarrolla y a partir de la cual se ejerce acción positiva sobre el crecimiento y desarrollo vegetal, esta temperatura es variable para cada cultivo y especie biológica, si bien la relación crecimiento – temperatura, no es una respuesta lineal.

El cálculo de grados - día acumulados y el conocimiento de las necesidades de cada fase fenológica ayudan a prever la ocurrencia y duración de las mismas, por lo tanto determinan el desarrollo esperado.

El concepto de la suma térmica como unidades de grados día ($^{\circ}D$), es el mejor descriptor del tiempo biológico (crecimiento y desarrollo) que los días calendario, si bien su calculo no presenta un método generalmente aceptado, o bien los trabajos no son claros en su metodología de calculo.

La manera mas simple para calcular de la suma térmica o grados día acumulados, consiste en sumar los grados día por encima de un umbral critico inferior o temperatura base, sin embargo, este sistema se ha objetado por considerar que el crecimiento biológico es la respuesta a tres temperaturas: Optima, mínima y máxima, conocidas como *temperaturas cardinales*, de las cuales también se objeta que estas se consideran como permanentes a través del ciclo del cultivo, lo cual no es correcto.

En el cultivo de la papa y además en esta investigación, se han utilizado tres fases fenológicas: Emergencia (EM), Inicio de Tuberización (TI), Senescencia (BS) y Cosecha (HA), Lopes & Buso, 1997; Kooman *et al.*, 1996, citados por Paula, F.L.M. de, *et al*, 2005.

Los datos bibliográficos revisados, sugieren que los requerimientos calóricos de los cultivos se encuentran en los siguientes rangos:

Requerimientos calóricos de los cultivos durante todo el período vegetativo Selyaninov, 1937), citado por Gastiazoro Blettler, Juliana (sf) y expresados en grados día acumulados

- Papa: 900-1000
- Lino: 1500-1700
- Maíz: 2000-2300
- Algodón: 3200-3600
- Cítricos: 4000-4500
- Datilero: 4500-5000

Se ha determinado que los dos principales factores ambientales que controlan el crecimiento y desarrollo de la papa son: La temperatura y el fotoperíodo (Levy and Kedar, 1985; Ewing and Struik, 1992, citados por Streck *et al* 2007). Estos factores se representan en los modelos de simulación del desarrollo, un componente de gran peso predictivo.

2.7.2. Metodología

2.7.2.1. Definición de temperaturas cardinales

Para el cálculo del tiempo termal acumulado o valor de los grados día acumulados se tomaron como referencia las temperaturas cardinales sugeridas para papa, por Manrique and Hodges, 1989, citados por Paula, F.L.M. de, *et al*, 2005:

Temperatura mínima: 4 °C .

Temperatura óptima: 15 °C .

Temperatura máxima: 28 °C .

Para la etapa que comprende desde inicio de tuberización (IT) hasta inicio de senescencia (BS) se tomaron como referencia las siguientes temperaturas cardinales:

Temperatura mínima: 7 °C.-- Temperatura óptima: 21 °C. --Temperatura máxima: 30 °C.

Estas temperaturas se analizaron bajo dos criterios: Temperaturas cardinales fijas a lo largo de todas las etapas de desarrollo del cultivo y temperaturas variables según la etapa de desarrollo del mismo, asumiendo que las temperaturas anteriores rigen para las etapas de desarrollo que comprenden desde la emergencia (EM) hasta el inicio de tuberización (IT) y desde la etapa de senescencia (BS) hasta la de cosecha (HA).

2.7.2.2. Cálculo del tiempo termal (unidades calóricas acumuladas) en grados día

Para el cálculo del tiempo termal en grados día se consideraron tres métodos basados en los algoritmos que se describen en la tabla 69, y su representación gráfica en la figura 40, adaptada de (Gilmore and Rogers, 1958, Arnold, 1982, citados por Streck *et al*, 2007).

Tabla 69. Algoritmos para el cálculo del valor de grados día.

Método 1

$$Tt1=0, \quad T < T_b$$

$$Tt1 = (T - T_b) \times 1 \text{ día}, \quad T \geq T_b$$

Método 2

$$Tt2 = 0, \quad T < T_b$$

$$Tt2 = (T - T_b) \times 1 \text{ día}, \quad T_b \leq T \leq T_{opt}$$

$$Tt2 = (T_{opt} - T_b) \times 1 \text{ día}, \quad T > T_{opt}$$

Método 3

$$Tt3 = 0, \quad T < T_b$$

$$Tt3 = (T - T_b) \times 1 \text{ día}, \quad T_b \leq T \leq T_{opt}$$

$$Tt3 = (T_{max} - T) (T_{opt} - T_b) / (T_{max} - T_{opt}) \times 1 \text{ día}, \quad T_{opt} \leq T \leq T_{max}$$

$$Tt3 = 0, \quad T > T_{max}$$

T: Temperatura del aire medida. *T_b:* Temperatura mínima de crecimiento

T_{opt}: Temperatura óptima de crecimiento. *T_{max}:* Temperatura máxima de

crecimiento. *Tt:* Tiempo termal calculado

Los valores de entrada de las temperaturas del aire, se tomaron de los registros de la estación automática localizada en el predio, estos datos corresponden a lecturas registradas cada 15 minutos, analizando además los valores de tiempo termal acumulado y su comportamiento a lo largo del periodo analizado, para los dos métodos de cálculo.

Solo se emplearon los valores de grados día calculados por los métodos 2 y 3, figura 41 ya que el método 1 asume un valor lineal creciente del tiempo termal para la temperatura en grados centígrados, aún para valores por encima del valor de la temperatura óptima, lo que no es realista desde el punto de vista fisiológico. Los dos métodos seleccionados en cambio

asumen que el tiempo térmico es constante para valores de temperatura por encima de la óptima (método 2) y que el tiempo termal disminuye a valores por encima de la temperatura óptima.

Los datos se procesaron para las fechas correspondientes a la siembra, emergencia, floración, senescencia y cosecha, el dato correspondiente al inicio de la tuberización se estimó con base en los datos de las muestras tomadas para destrucción y pesaje (cuando aparecen los primeros tubérculos), fecha que se determinó como el 2 de marzo de 2007, según la escala que se relaciona a continuación, adaptada del trabajo publicado por Paula, F.L.M. de, *et al*, 2005.

- EMERGENCIA (EM)

Cuando el 50% de las plantas en el lote o parcela ha emergido del nivel del suelo (brotes visibles), Sands *et al.*, 1979, citado por Paula, F.L.M. de, *et al*, 2005.

- INICIO DE TUBERIZACION (TI)

Se determina cuando el 50% de las plantas muestreadas (sobre la base del 20%) presenta por lo menos un tubérculo de al menos 1 cm de diámetro (se confirmó por la fecha de destrucción donde aparecen los minitubérculos), Sands *et al*, 1979; Manrique and Hodges, 1989, citados por Paula, F.L.M. de, *et al*, 2005.

- SENESCENCIA (BS)

Se determinó cuando por lo menos el 50% de las plantas en la parcela presentó amarillamiento en las primeras hojas inferiores, Según la escala de Batz, Batz *et al.*, 1980, citado por Paula, F.L.M. de, *et al*, 2005.

- COSECHA (HA)

Se determinó cuando el 100% de las plantas de la parcela se observan completamente muertas (estado 89 de la escala de Batz, Batz *et al*, 1980, citado por Paula, F.L.M. de, *et al*, 2005.

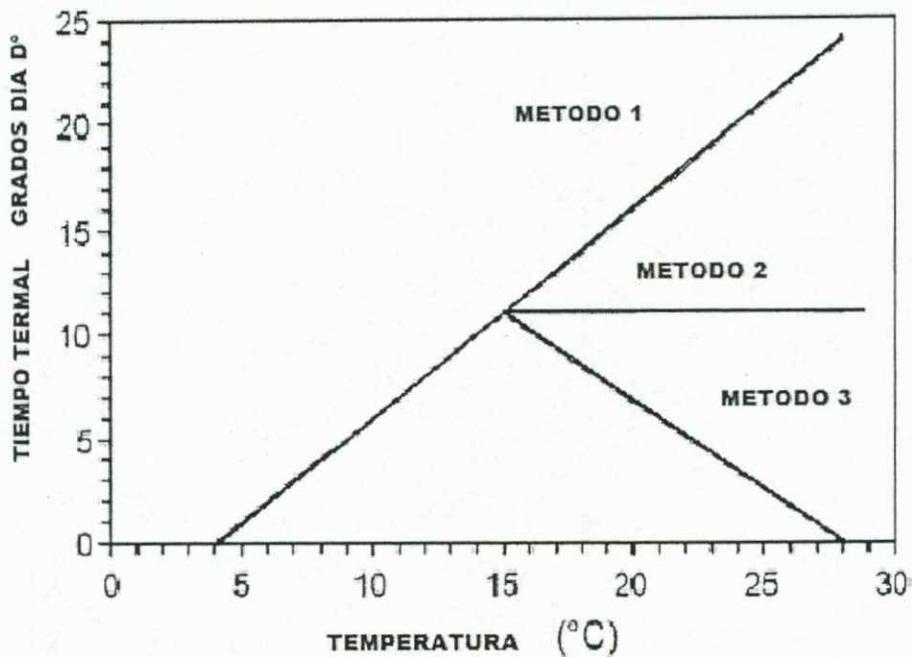


Figura No 40. Representación gráfica de tres métodos de cálculo de la suma térmica. Tomado de Streck et al, 2007

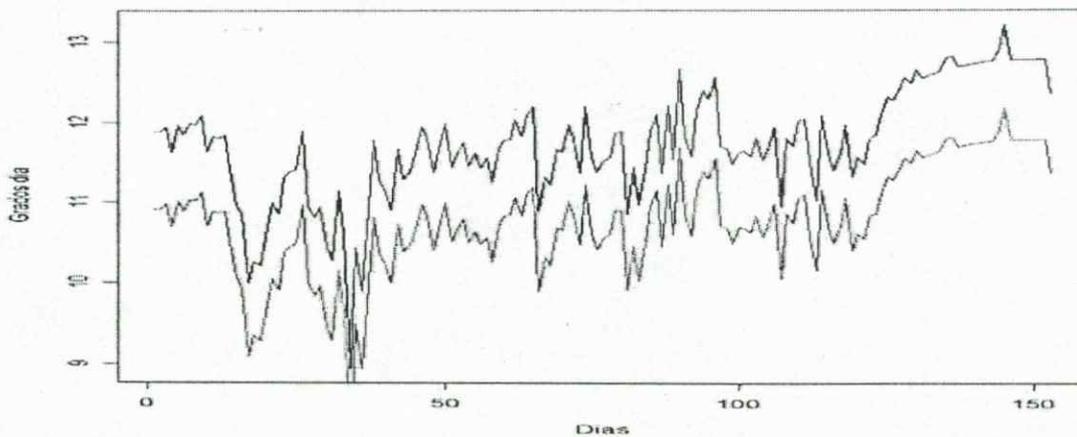


Figura 41. Cálculo de grados día ($^{\circ}\text{D}$), para el periodo de desarrollo del primer ciclo cultivo. Enero 2007 a Junio de 2007. Línea en rojo: $^{\circ}\text{D}$ por método 2. Línea negra: $^{\circ}\text{D}$ Método 3. Municipio de Medellín, vereda Santa Elena, Centro Paysandú.

2.7.2.3. Estadística descriptiva

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente mediante prueba de máxima similitud, mediante el paquete estadístico R. Se establecieron varios modelos de regresión correlacionando las variables tiempo cronológico y tiempo térmico acumulado (variable independiente) contra biomasa total acumulada (variable dependiente), para comparar y contrastar los resultados obtenidos y determinar el modelo de mejor ajuste y su mejoramiento predictivo posterior.

Los datos de biomasa seca en función de los días calendario y el tiempo termal se ajustaron en forma no paramétrica a un modelo de regresión simple y un modelo de regresión multilineal con efectos cuadráticos y cúbicos, adicionalmente se analizó un modelo logarítmico (Ln de masa seca) y se valoraron los mejores ajustes. Los procedimientos fueron realizados usando el paquete estadístico R.

2.7.3. Discusión de modelos de crecimiento

En los modelos más recientes temperatura y fotoperíodo se reemplazan por funciones de respuesta a temperatura y fotoperíodo (Streck *et al.*, 2003), variables que en el presente trabajo también fueron calculadas, encontrando que la respuesta a termoperíodo fue suficiente para estimar correctamente la primera etapa de desarrollo de la planta, figura 42 por lo que el fotoperíodo fue omitido en los datos correspondientes a las demás etapas, ya que la papa se considera una planta de día corto para la etapa de inicio de tuberización (TI) y una planta de día largo o neutral para las restantes etapas (Levy and Kedar, 1985; Ewing and Struik, 1992; Van Dam *et al.*, 1996, citados por Streck *et al.*, 2007). Adicionalmente las plantas de papa, pueden responder a estímulos de fotoperíodo inmediatamente emergen del suelo (EM) ya que esta señal se percibe a nivel del follaje (Ewing and Struik, 1992, citado por Streck *et al.*, 2007). El fotoperíodo afecta el ciclo de desarrollo del cultivo principalmente durante la etapa vegetativa (EM – TI) presentando poca o ninguna influencia en las restantes etapas de desarrollo (Kooman *et al.*, 1996b; Haverkort and Kooman, 1997, citados por Streck *et al.*, 2007)

Se considera que la respuesta al fotoperíodo en papa, presenta dependencia del genotipo (Kooman *et al.*, 1996a,b; Van Dam *et al.*, 1996, citados por Streck *et al.*, 2007) y de la fase de desarrollo (Kooman *et al.*, 1996b, citado por Streck *et al.*, 2007) y nuestros resultados preliminares indican que las variedades altoandinas de la subespecie *Andigenum*, no presentan esta dependencia del fotoperíodo, aunque deberán analizarse otras variables compuestas de mayor complejidad como la tasa de radiación PAR interceptada en función del IAF, etc.

2.7.3.1. Método de cálculo de los grados día

En la tabla 70 se observan los valores reportados para el trópico en la subespecie *tuberosum* y puede inferirse la duración total del periodo de desarrollo de la planta.

La comparación entre los diferentes métodos de cálculo se ve dificultada por las diferencias de escala que asume cada método, figura 41, donde se indica el comportamiento de los grados día para las dos metodologías de cálculo y durante todo el ciclo del cultivo, estas indican que la diferencia diaria en valor numérico entre los dos métodos es de aproximadamente 1 D°, que equivale a unos 150 grados día diferencia total acumulada, por esta razón, se abordó una metodología que permitiera comparar los valores predictivos en función de una escala absoluta, mediante transformaciones de escala y asumiendo un valor único de duración del ciclo para todos los métodos de cálculo sugeridos. Los resultados se observan en la figura 42.

Tabla 70. Valores acumulados de tiempos termales (Do) para los tres métodos seleccionados, para las etapas de desarrollo EM-TI, TI-BS, BS-HA en la variedad de papa Asterix, reportados por Strech *et al*, 2007, en Santa Maria, Rio Grande (Brazil) subespecie tuberosum.

Método de cálculo	Fase de desarrollo			
	EM-TI	TI-BS	BS-HA	Total
T _{t1 acc}	333.4	516.4	372.3	1222.1
T _{t2 acc}	217.2	454.1	264.6	935.9
T _{t3 acc}	118.9	356.9	119.9	595.7

EM: Emergencia, TI: Inicio Tuberización, BS: Inicio de Senescencia, HA: Cosecha

El análisis comparativo en escala absoluta, nos permite ver que hay una alta correspondencia entre la duración total del periodo de crecimiento calculada por el método 1, no adoptado en esta primera parte del experimento y reportada para el trópico en variedades de la subespecie tuberosum y la calculada por medio de días calendario para nuestro experimento con variedades altoandinas de la subespecie andigenum.

En contraste puede observarse además que no existen diferencias marcadas para la duración absoluta de la etapa vegetativa (EM-TI) calculada por el método 1 y nuestras tres escalas propuestas (días calendario, método 2 y método 3 en grados día). Los dos métodos empleados no presentan diferencia en la duración de las demás etapas en nuestro experimento y su diferencia de escala es de 40 – 90 grados día, lo que corresponde a unos 4 – 7 días calendario (el valor diario de grados día oscila entre 10 y 12 D°)

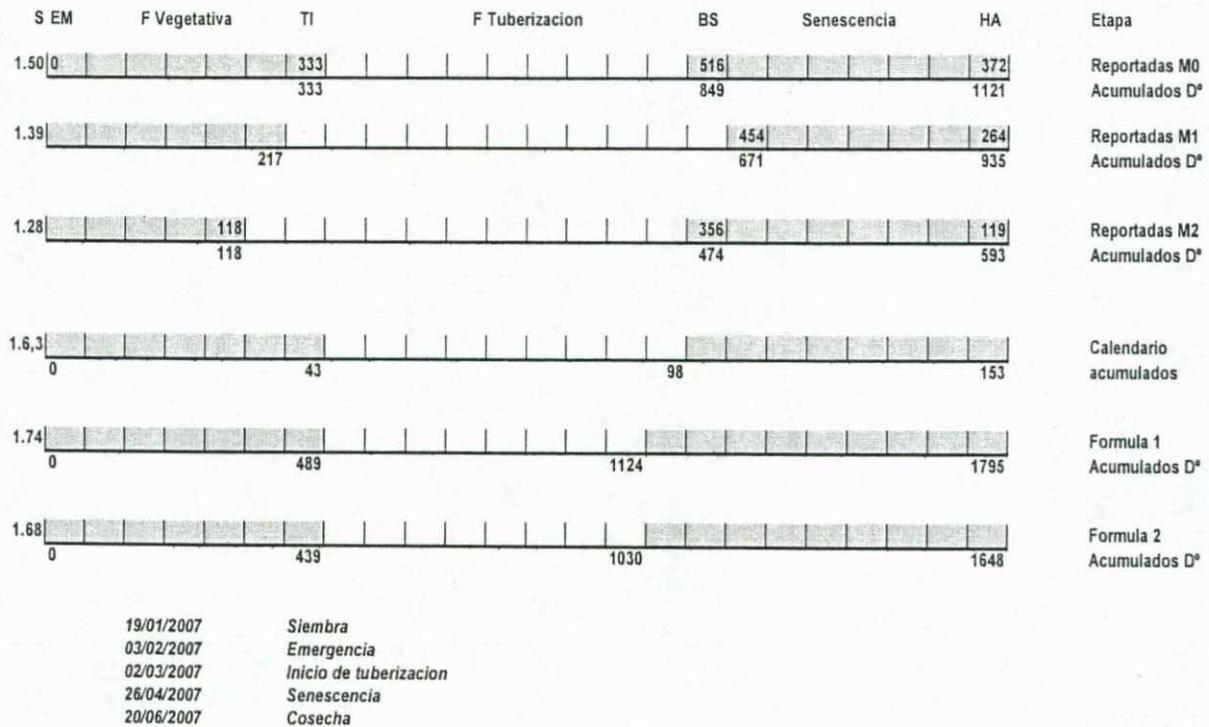
Las discrepancias en el ajuste del modelo pueden deberse a la adopción de temperaturas cardinales constantes en esta primera aproximación al modelo, por lo que se verificara si la adopción de temperaturas cardinales variables puede ajustar mejor los valores de grados día acumulados, con los de días calendario acumulados.

Es importante notar que las escalas relativas de duración total del ciclo, si presentan diferencias marcadas con respecto a los datos reportados y los encontrados, lo que podría sugerir que existe una respuesta termodiferencial entre los acervos o subespecies tuberosum

y andigenum lo que ocasiona duraciones mayores del ciclo en estas últimas. Por otro lado esto puede deberse a otros efectos no percibibles en un solo ciclo de desarrollo, por lo que deberá analizarse este aspecto en mas profundidad.

Una vez verificada la escala absoluta y su consistencia predictiva, se procedió a analizar un modelo de regresión lineal simple, de efecto cuadrático y cúbico con y sin interacciones, para correlacionar los valores de biomasa seca y tiempo cronológico o termal acumulado, obteniéndose luego de la selección, depuración y simplificación de los modelos basada en análisis de residuales, los siguientes resultados.

ETAPAS DE DESARROLLO DE LA PAPA BASADA EN GRADOS DIA



Etapas : Siembra (S) - Emergencia (EM) - Inicio de tuberización (TI) - Senescencia (BS) - Cosecha (HA)
 Escala 1-50 equivalentes grados día acumulados
 (Kooman et al, 1968: Lopez and Buso, 1997)
 (Streck et al, 2007)

Figura 42. Etapas de desarrollo de la papa (*Solanum tuberosum*. Var. Diacol Capiro) basada en grados día. Adaptación para el primer ciclo de cultivo.

2.7.3.2. Modelos de regresión

El primer modelo analizado fue el de regresión lineal simple sin interacciones y como función de la masa seca (en gramos), por su baja correlación (25%) se descarto esta aproximación, elevando la complejidad del modelo de análisis, como se ilustra a continuación.

2.7.3.2.1. Modelo de masa seca total (en gramos) en función de los grados día acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico

El modelo resulta altamente significativo para grados día lineales, cuadráticos y cúbicos, además para el intercepto. No se presenta efecto de la parcela ni del tratamiento, pero el coeficiente de regresión ajustado es de 66%, lo que se traduce en que los grados días acumulados pueden explicar el 66% de los cambios en acumulación de biomasa. Dado esta baja correlación se procedió a transformar la variable masa seca a escala logarítmica como lo sugirió la grafica (no mostrada) de dispersión de los datos.

Valores de los parámetros del modelo, tabla 71.

lm(formula = mtotal ~ par + tto + gd1 + gd2 + gd3, data = gradosD)

Residuals:

Min 1Q Median 3Q Max
-135.172 -24.197 -2.758 14.651 183.942

Tabla 71. Valores residuales del modelo de masa seca total en función de los grados día acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico

	Estimate	Std.Error	tvalue	Pr(> t)	
(Intercept)	-490.50	41.86	-11.72	<2.00E-16	***
par	-3.60	1.57	-2.30	0.02	*
tto	0.00	0.00	-0.52	0.60	
gd1	258.20	46.75	5.52	0.00	***
gd2	-280.70	51.01	-5.50	0.00	***
gd3	0.00	0.00	-8.33	0.00	***
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					
Residual standard error: 48.26 on 138 degrees of freedom					
Multiple R-Squared: 0.6753, Adjusted R-squared: 0.6635					
F-statistic: 57.4 on 5 and 138 DF, p-value: < 2.2e-16					

2.7.3.2.2. Modelo de logaritmo de la masa seca total, en función de los días calendario acumulado, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.

Valores de los parámetros del modelo, tabla 72.

lm(formula = mtotal_L ~ par + tto + dia + dia2, data = gradosD)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1.80835	-0.25390	0.03190	0.25822	1.27459

Tabla 72. Valores residuales del modelo logarítmico de la masa seca total, en función de los días calendario acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-5.13	0.43	-11.94	< 0.00	***
par	-0.04	0.01	-3.11	0.00	**
tto	0.00	0.00	-0.22	0.83	
dia	0.28	0.01	21.29	< 0.00	***
dia2	0.00	0.00	-19.15	< 0.00	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Este modelo como se observa es altamente significativo para los efectos de días acumulados, días acumulados al cuadrado y el intercepto (el efecto cúbico fue suprimido en función de su escaso aporte) no es significativo para los efectos de tratamiento, pero si aunque en menor grado para el efecto de la parcela (grados de pendiente). Como se observa el coeficiente de regresión es del 82%, siendo bastante elevado para un experimento de este tipo que involucra variables biológicas, edafológicas y climáticas, bastante complejas. Por su simplicidad, este modelo sería apropiado para modelar el crecimiento y desarrollo del cultivo en la zona en estudio.

Aquí se discutió sobre la pertinencia desde el punto de vista fisiológico de la estimación en días calendario de las etapas de desarrollo y la duración del ciclo, ya que como se sabe la temperatura es una variable bioclimática y ecológica, validada en modelos de dinámicas ecológicas, en tanto los días calendario o el tiempo cronológico no representa una variable bioclimática exacta y en cambio si pueden contribuir a confundir o enmascarar dichos efectos. En torno a esta discusión se avanzó en el modelamiento basado en grados día o tiempo termal (unidades calóricas acumuladas) para acercar el modelo a una aproximación más fisiológica y valorar su poder predictivo.

Es de aclarar que la consistencia de los datos presentados en días calendario, puede obedecer a que en la zona no se presentaron datos extremos de temperaturas, que superarían los valores cardinales propuestos y en cambio la temperatura del aire se mantuvo muy

cercana a la óptima cardinal, por lo que es de esperar que los comportamientos predictivos sean semejantes, sin que por ello exista una relación importante y consistente que pueda ser generalizada en modelos de crecimiento y desarrollo, se esperaría que en zonas con variables extremas en biotemperatura y aun con valores medios menores o mayores a la temperatura optima cardinal, la diferencia entre el tiempo cronológico y el termal, sea mucho mas evidente.

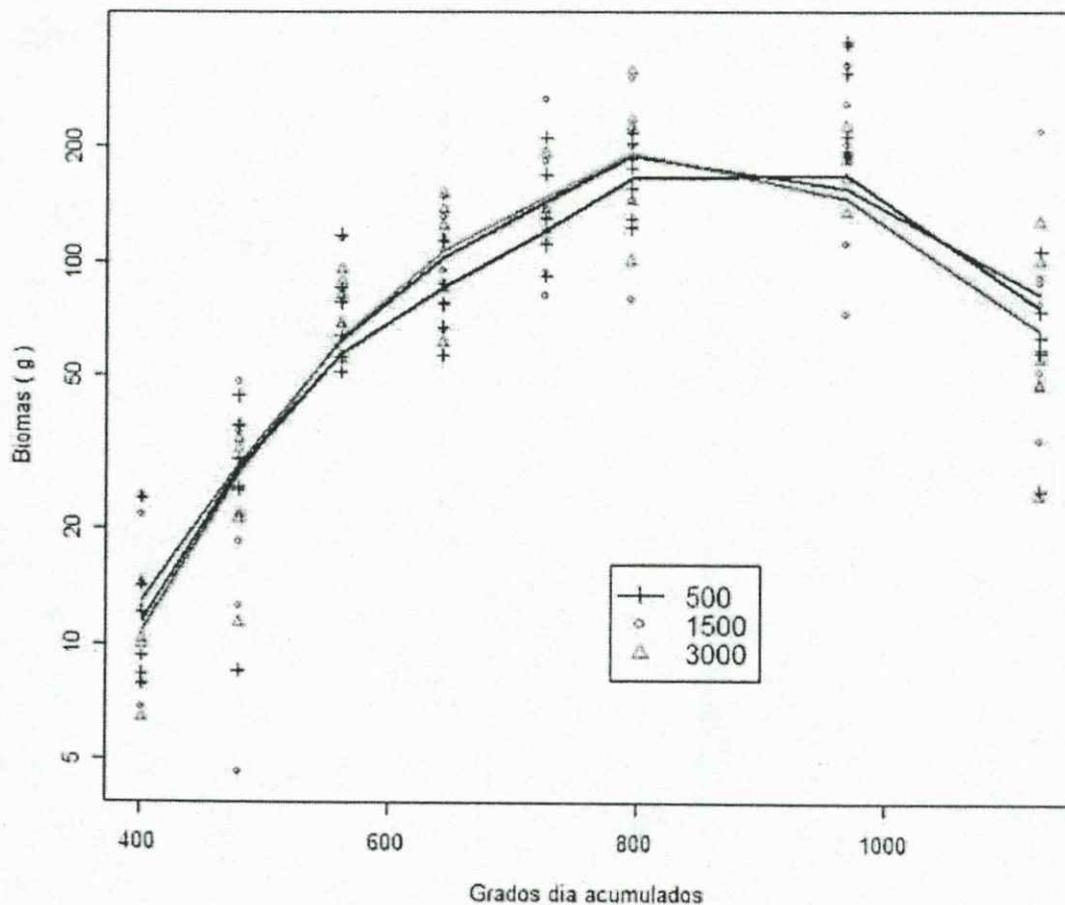


Figura 43. Modelo de logaritmo de la masa seca total de las plantas de papa (gramos), en función de los grados días (D°) acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.

2.7.3.2.3. Modelo de logaritmo de la masa seca total, en función de los grados días (D°) acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico.

Valores de los parámetros del modelo, tabla 73.

$\text{lm}(\text{formula} = \text{mtotal_L} \sim \text{par} + \text{tto} + \text{gd1} + \text{gd2} + \text{gd3}, \text{data} = \text{gradosD})$

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1.76573	-0.25419	0.02611	0.26515	1.34526

Tabla 73. Valores residuales del modelo logarítmico de la masa seca total, en función de los grados días (D°) acumulados, bajo un modelo lineal con efecto simple, cuadrático y cúbico

	Estimate	Std.Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-2.50	0.37	-6.71	0.00	***
par	-0.04	0.01	-3.14	0.00	**
tto	0.00	0.00	-0.22	0.83	
gd	0.03	0.42	0.08	0.94	
gd ²	-0.02	0.45	-0.05	0.96	
gd ³	0.00	0.00	-17.48	<0.00	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.4287 on 138 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.8304, Adjusted R-squared: 0.8242

F-statistic: 135.1 on 5 and 138 DF, p-value: < 2.2e-16

Los resultados obtenidos verifican la alta correlación obtenida en el cálculo de días calendario, pero esta vez en función de grados día o tiempo termal acumulado, con lo que se logra una aproximación similar, pero más realista desde el punto de vista fisiológico.

El modelo presenta efectos significativos cúbicos y para el intercepto, con un efecto moderado de las parcelas, este modelo se debe adoptar y valorar por su poder predictivo para el otros ciclos de cultivo, ajustando los métodos de cálculo de D° y evaluando la mejora o no de la correlación propuesta.

Bajo este modelo se corrió un análisis gráfico cuya curva de respuesta se presenta en la figura 43, que como puede observarse es muy similar a la obtenida para semanas y días acumulados, figura 30, lo que sugiere se realice un análisis posterior de las tres variables involucradas (semanas, días y grados día).

2.7.4. Conclusiones

Los datos fueron procesados para establecer la correlación de un modelo lineal aditivo de efecto simple, cuadrático y cúbico y sus interacciones, determinándose que el modelo cúbico sin interacciones es el de mejor ajuste, sin embargo la variable biomasa seca no correlacionó satisfactoriamente con el mismo (R de 0,65). Al emplear la variable transformada logaritmo de la biomasa, el modelo ajusto de forma sobresaliente (R de 0,82).

El análisis de varianza resultó significativo en un 99,9% para los grados día acumulados en función de la temperatura del aire, calculados por dos métodos, al igual que para los días calendario medidos en semanas y días acumulados, frente a la variable respuesta Ln de la masa seca total, lo que sugiere un modelo de tipo exponencial. Las interacciones de D° con dosis (tratamientos) y el efecto de los bloques no fueron estadísticamente significativas.

Los grados día acumulados calculados para la variedad Diacol Capiro, presentan valores muy altos para los métodos de cálculo 1 y 2, doblando y triplicando los valores reportados para el trópico con variedades de la subespecie tuberosum (escalas proporcionales – valores diferenciales) por lo que es apropiado revisar la posibilidad de ajuste en función de temperaturas cardinales variables y de las etapas de desarrollo de la planta.

El mejor ajuste de escala se logra con días calendario acumulados y grados día reportados por el método 0 (que asume respuesta lineal creciente) lo que puede deberse al rango de temperaturas de la zona, dado que no se alcanzan valores extremos.

Se consiguieron mejores ajustes para EM-TI, que para las dos etapas siguientes, al parecer no se requeriría incluir la variable fotoperíodo, ya que es precisamente esta etapa la más sensible al mismo y sin embargo ajusto bien para todas las escalas, lo que indica que el termoperíodo es el factor determinante en la inducción de tuberización bajo las condiciones evaluadas.

2.7.5. Recomendaciones

Se podría mejorar o no el ajuste del modelo al incorporar las variables fotoperíodo o idealmente la radiación fotosintéticamente activa (PAR) potencialmente absorbida en función del índice de área foliar (IAF), adicionalmente se sugiere incorporar una variable compuesta denominada fototermoperíodo para evaluar el incremento en biomasa total en función del tiempo térmico acumulado y probar un modelo adicional de función respuesta.

Debe verificarse el valor estimado por el modelo con el valor medido durante el segundo ciclo del cultivo, para evaluar el desempeño del mismo y validar su poder predictivo.

Se desea continuar con el desarrollo de un modelo de tipo exponencial, no lineal que presente condiciones apropiadas de robustez y precisión.

2.8. Respuesta a la fertilización

La respuesta del cultivo de la papa a la fertilización utilizada, 500, 1,500, 3,000 kg de un fertilizante 10-20-20, se evaluó para los dos ciclos de cultivo. En la tabla 74 y 75, se encuentran los resultados de la cosecha, de las 35 plantas seleccionadas, de acuerdo al diseño estadístico, además la producción del resto de la parcela y el total de la parcela. El análisis estadístico obviamente se realizó con la producción de las plantas seleccionadas. La

segunda cosecha fue de menor producción por efecto de la fuerte granizada que afectó el cultivo en el mes de octubre de 2007.

2.8.1. Análisis de varianza primer ciclo

El análisis de varianza se encuentra en la tabla 76., la cual indica que no hay diferencias significativas entre los promedios de rendimientos para los diferentes tratamientos

2.8.2. Análisis de varianza segundo ciclo

El análisis de varianza se encuentra en la tabla 77, el cual indica que hay diferencias entre los tratamientos. Para definir qué tratamientos son diferentes, se aplicó la prueba de Tukey, tabla 78, lo que permite concluir que son diferentes los tratamientos 1,500 y 500 a favor de 1,500 con un rendimiento promedio de 35.67 kg sobre 24.27 kg. También son diferentes los tratamientos de 1,500 y 3,000 a favor de 1,500 donde el rendimiento de 3,000 fue de 22,65 kg. No hay diferencias entre 500 y 3000. Lo anterior indica que para este segundo ciclo el mejor tratamiento fue el de 1500 kg/ha de un fertilizante 10-20-20.

Las plantas ubicadas en las parcelas que recibieron la fertilización de 3,000 kg, presentaron mayor altura, mas volcamiento por efecto del viento y mayor susceptibilidad al ataque de gotera (*Phytophthora infestans*), lo que explica su menor producción de tubérculos en este ciclo.

Tabla 74. Rendimiento (kg/parcela) de las 35 plantas seleccionadas para cosecha en el primer ciclo de cultivo.

Rendimientos de la primera cosecha (kg de tubérculos/parcela). 35 plantas seleccionadas									Resto	Total	Total
	Tto(kg/ha)	>T1	<T1>T2	<T2>T3	<T3	Bloque	Tto	Total	Parc. (kg)	Parc. kg	kg/ha
Parcela 1	1500	13.05	18.54	2.12	0.52	A	1500	34.23	151.49	185.72	50882.60
Parcela 2	3000	11.56	15.44	2.42	1.06	A	3000	30.47	170.69	201.16	55112.88
Parcela 3	500	14.88	15.82	1.85	0.42	A	500	32.98	140.09	173.07	47416.16
Parcela 4	3000	8.61	17.08	2.88	1.17	B	3000	29.74	96.94	126.68	34707.12
Parcela 5	1500	19.10	14.72	2.29	0.67	B	1500	36.78	142.69	179.47	49170.27
Parcela 6	500	10.76	16.06	1.98	0.49	B	500	29.29	127.75	157.04	43025.34
Parcela 7	500	9.52	11.33	1.30	0.34	C	500	22.48	131.52	154.01	42193.29
Parcela 8	3000	12.48	12.06	2.31	0.93	C	3000	27.78	108.78	136.56	37414.25
Parcela 9	1500	11.70	10.99	1.72	0.44	C	1500	24.85	126.84	151.69	41559.45

>T1: Tubérculos mayores de 6 cm, <T1>T2: Tubérculos entre 4 y 6 cm, <T2>T3: Tubérculos entre 2 y 4 cm, <T4: Tubérculos menores de 2 cm

Tabla 75. Rendimiento (kg/parcela) de las 35 plantas seleccionadas para cosecha en el segundo ciclo de cultivo.

Rendimientos de la segunda cosecha (kg de tubérculos/parcela). 35 Plantas seleccionadas									Resto Parc. (kg)	Total Parc. kg	Total kg/ha
	Tto(kg/ha)	>T1	<T1>T2	<T2>T3	<T3	Bloque	Tto	Total			
Parcela 1	1500	19.39	14.93	2.45	0.92	A	1500	37.69	67.85	105.54	28914.25
Parcela 2	3000	7.08	12.65	2.77	1.32	A	3000	23.82	55.78	79.60	21809.45
Parcela 3	500	8.78	10.18	1.59	0.60	A	500	21.15	62.74	83.90	22985.34
Parcela 4	3000	1.84	13.17	4.65	2.51	B	3000	22.17	60.88	83.04	22751.51
Parcela 5	1500	8.88	23.32	5.60	2.74	B	1500	40.55	37.20	77.75	21301.78
Parcela 6	500	11.32	14.48	1.81	0.59	B	500	28.20	54.56	82.76	22673.15
Parcela 7	500	11.63	10.32	1.14	0.37	C	500	23.46	47.87	71.33	19542.05
Parcela 8	3000	5.49	11.91	3.28	1.29	C	3000	21.97	53.63	75.61	20714.11
Parcela 9	1500	15.05	11.11	1.98	0.63	C	1500	28.77	54.90	83.66	22921.78
Parcela 1	1500	19.39	14.93	2.45	0.92	A	1500	37.69	67.85	105.54	28914.25

>T1: Tubérculos mayores de 6 cm, <T1>T2: Tubérculos entre 4 y 6 cm, <T2>T3: Tubérculos entre 2 y 4 cm, <T4: Tubérculos menores de 2 cm

Tabla 76. Análisis de varianza primer ciclo.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
f bloque	2	104544569	52272284	5.9832	0.06276
f Tto	2	21757093	10878547	1.2452	0.37982
Residual	4	34945980	8736495		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tabla 77. Análisis de varianza segundo ciclo de cultivo

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
f bloque2	2	46548006	23274003	1.6387	0.30211
f Tto2	2	301855837	150927919	10.6268	0.02509 *
Residuals	4	56810406	14202601		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tabla 78. Prueba de Tukey

\$f Tto2	diff	lwr	upr	p adj
1500-500	11396.5	429.8332	22363.167	0.044337
3000-500	-1617.333	-12584.0001	9349.333	0.863574
3000-1500	-13013.833	-23980.50001	-2047.167	0.028857

3.0. Bibliografía

Arnold, C.Y. 1960, Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. American Society for Horticultural Science, Boston, v.76, p. 682-692.

Assouline, S. , M. Ben-Hur (2006). Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing . *Catena* 66: 211 – 220

Baffaut, C., Nearing, M.A., Govers, G., 1998. Statistical distributions of soil loss from runoff plots and the WEPP model simulations. *Journal of Soil Science Society America* 62, 756– 763.

Batz, W. *et al.* 1980. Entwicklungsstadien der kartoffel. Berlin: Biologische Bundesanstalt für land-und forstwirtschaft, Merkablatt, N. 27/5

Boardman, John . 2006, Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches *Catena* 68: 73 – 86

Burkholder J A and Glasgow H B Jr 1997 *Pfiesteria piscicidia* and other *Pfiesteria*-dinoflagellates behaviors, impacts, and environmental controls. *Limnol. Oceanogr.* 42, 1052–1075.

Castro, E. H.; Guío, V; C. (1998). “Significado de la fertilización potásica en el rendimiento y la calidad industrial del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.)”. En:

Cipermetrina. Comercio exterior. Cipermetrina. Disponible en: www.chemotecnica.com/esp/comercio/activos/cipermetrina.htm Consultado: mayo 2008.

Cipermetrina. Nombre del producto: cipermetrina técnica (insecticida). Hoja de datos de seguridad de materiales. Disponible en: www.chemotecnica.com/esp/comercio/seguridad_PDF/CIPER%20TEC%20_MAIL_.pdf. Consultado: mayo 2008

Guerrero, R. (Ed.) Fertilización de cultivos de clima frío. Segunda Edición. Monómeros Colombo Venezolanos S.A. (Ema). Bogotá. P. 135-13.

Evans, R., 1995. Some methods of directly assessing water erosion of cultivated land — a comparison of measurements made on plots and in fields. *Progress in Physical Geography* 19 (1), 115– 129.

Ewing, E. E., Struik, P.C.1992. Tuber Formation in Potato. Induction, Initiation and Growth. *Hortic. Rev.*14: 89-198.

FEDEPAPA, (2005). Federación Colombiana de Productores de Papa, “Generalidades del cultivo de papa en Colombia. (Crecimiento y desarrollo)”. En: Guía para el cultivo de papa. Primera edición. FEDEPAPA. Bogotá. Colombia. P. 17-19.

Gastiazoro Blettler, Juliana. Bioclimatología Agrícola. Influencia del Clima sobre las Plantas Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ciencias Agrarias. Climatología y Fenología Agrícola. Influencia del Clima sobre las Plantas. http://www.redagraria.com.ar/investigacion/fca_unc/clima-fenol_fca_unc/apunte_fenologia/6_temp_para_crec_desarrollo.html

Gilmore, E.C.Jr.; Rogers, J.S. 1958. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agronomy Journal*, Madison, v.50, n.10, p.611-615.

Grandett, J.G., Lora, S. R. (1978), Acumulación de materia seca y de varios nutrimentos en tres variedades de papa cultivadas en la serie Mosquera del centro Experimental Tibaitata. En: Instituto Colombiano Agropecuario. Informe de progreso 1978. Programa Nacional de Suelos. Bogota (Colombia), p. 98-103.

Gutiérrez, C. M. (2005). "Análisis de crecimiento del cultivo de papa". En: Primer taller nacional sobre los suelos, fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de la papa. CEVIPAPA, Bogotá. Colombia. P. 18-23.

Haverkort, A.J. and Kooman, P.L. 1997. The use of systems analysis and modelling of growth and development in potato ideotyping under conditions affecting yields. *Euphytica* 92:191-200.

Hodges, T. 1991. *Predicting Crop Phenology*. CRC, Boca Raton. 233p.

Jaramillo, Daniel, F. 2002. *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Fac. Ciencias. Medellín, p. 613 p.

Jetten, V., Favis-Mortlock, D., in press. Modelling soil erosion in Europe. In: Boardman, J. Poesen, J. (eds), *Soil Erosion in Europe*, Wiley, Chichester, UK.

Kadaja, J. 2004. Influence of fertilisation on potato growth functions. *Agronomy Research*. 2:1, 49-55.

Kadaja, J. and Tooming, H. 2004. Potato production model based on principle of maximum plant productivity, *Agricultural and forest Meteorology*, 127, 17-33.

Kleeberg, Andreas; Andrea Schapp; Detlef Biemelt. 2008. Phosphorus and iron erosion from non-vegetated sites in a post-mining landscape, Lusatia, Germany: Impact on aborning mining lakes. *Catena* 72: 315-324.

Kooman, P.L.; Fahem, M. Tegera; P. Haverkort, A.J. 1996a. Effects of climate on different potato genotypes. 1. Radiation interception total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy*, Amsterdam, v.5. p.193-205.

Kooman, P.L.; Fahem, M. Tegera; P.; Haverkort, A.J. 1996b. Effects of climate on different potato genotypes. 2. Dry matter allocation and duration of the growth cycle. *European Journal of Agronomy*, Amsterdam, v.5. p.207-217.

Kotak B G, Kenefick S L, Fritz D L, Rousseaux C G, Prepas E E, and Hrudey S E 1993 Occurrence and toxicological evaluation of cyanobacterial toxins in Alberta lakes and farm dugouts. *Water Res.* 27, 495–506.

Levy, D., Kedar, N. 1985. *Solanum tuberosum*. In Halevy, A. H. (Ed). CRC Hand book of Flowering . Boca Raton. CRC V. IV. pp363-366.

Lopes, C.A.; Buso, J.A. 1997. Cultivo de batata (*Solanum tuberosum* L.). Brasília: Embrapa Hortaliças, 35p.

Manrique, L.A.; Hodges, T. 1989. Estimation of tuber initiation in potatoes grown in tropical environments based on different methods of computing thermal time. *American Potato Journal*, Orono, v.66, p.425-436.

Millington, A.C. 2006. Reconnaissance scale soil erosion mapping using a simple geographic information system in the humid tropics. Dept. of Geography, University of Reading, Whiteknights, Reading, Berks, UK. Available online [<http://www2.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub40/pub40-h5.pdf>]. Last verified: June 10th, 2006.

Nishimura, T., Nakano; M., Miyazaki, T. 1993. Properties of surface crusts of an andisol and their effects on soil-hydrological processes. *Catena Suppl.* 24, 17–28.

Paula, F. L. M.; N. A. Streck; A. B. Heldwein; D. A. Bisognin; A. L. de Paula; J. Dellai. 2005. Soma Térmica de Algumas Fases do Ciclo de Desenvolvimento da Batata (*Solanum tuberosum* L.). *Ciencia Rural*, Santa Maria, vol 35 No 5, p 1034 – 1042. ISSN 0103-8478.

Pla Sentis, I., 1992. La erodabilidad de los Andisoles en Latino America—tercer panel Latino Americano sobre suelos derivados de cenizas volcanicas. *Suelos Ecuat.* 22 1 , 33–43.

Penning de Vries, F.W.T., Jansen, D. M. Ten, Berge, H. F. M. Bakena, A. 1989. Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops. Wageningen: Pudoc. 271p.

Poesen, J.; Cerdan, O.; de Vente, J.; Govers, G.; Gyssels, G.; Nachtergaele, J.; Ruyschaert, G.; Vandekerckhove, L.; Vanwallegem, T.; Vandeneeckhautte, M.; Van Oost, K.; Van Rompaey, A.; Verstraeten, G. 2003. 25 years of assessment of erosion. Keynote Paper International symposium, University of Gent, 22– 26 September, 2003.

Poulenard Jerome, Pascal Podwojewski, Jean-Louis Janeau, Jean Collinet. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Paramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45: 185–207.

Polevoy, A. N., 1983. Teoriya i raschet produktivnosti sel'skokhoz-jayaistvennykh kul'tur. *Gidrometeoizdat, Leningrad*. (en Ruso, abstract en Ingles)

Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Reunion. Consequences pour la mise en valeur agricole. CIRAD Editions, Montpellier.

Rodriguez, Rodriguez, A. C.D. Arbelo, J.A. Guerra, J.L. Mora, J.S. Notario, C.M. Armas. 2006. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andosols. *Catena* 66:228 – 235.

Romero, Consuelo, C., Leo Stroosnijder, Guillermo A. Baigorria . 2007 Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena* 70: 105–113

Robertson, Fiona A. , David M. Nash. (2008). Phosphorus and nitrogen in soil, plants, and overland flow from sheep-grazed pastures fertilized with different rates of superphosphate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 126: 195–208

Sands, P.J.; Hackett, C.; Nix, H.A. 1979. A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). I - Derivation from well-managed field crops. *Field Crops Research, Amsterdam*, v.2, n.4, p.309-331.

Schoumans, O. F.; Breeuwsma, A. 1997. The relation between accumulation and leaching of phosphorus: laboratory, field and modelling results. In *Phosphorus loss from soil to water*. Eds. H. Tunney, O. T. Carton, P. C. Brookes and A. E. Johnston. pp 361–363.

Sharpley, Andrew, N.; Richard W. McDowell; Peter J. A. Kleinman. 2001. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. *Plant and Soil* 237: 287–307.

Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T and Pote D H 1996 Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J. Soil Water Conserv.* 51, 160–166.

Chlorothalonil (ref:ds2787). General Information. Disponible en: sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/en/Reports/150.htm. Consultado en mayo 2008.

Sonneveld, B.G.J.S., M.A. Nearing. 2003. A nonparametric/parametric analysis of the Universal Soil Loss Equation. *Catena* 52: 9– 21.

Streck, N. A., Weiss, A., Xue, Q. Baenziger, P. S. 2003. Improving Predictions of Developmental Stages in Winter Wheat. A Modified Wang and Engel Model. *Agric. Forest. Meteorol.* 115: 139-150.

Streck, N. A, Fabiana Luiza Matielo de Paula, Dilson Antonio Bisognin, Arno Bernardo Heldwein, Jacso Dellai. 2007. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agricultural and Forest Meteorology*.142:1-11.

Suarez de Castro Fernando y Alvaro Rodriguez Grandas. 1962. Investigaciones sobre la Erosión y Conservación de los Suelos en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros. Bogotá. 473p.

Tekalign, T. and P.S. Hammes, 2005. Growth and biomass production in potato grown in the hot tropics as influenced by paclobutrazol. *Plant Growth Regulation* (2005) 45: 37–46. Springer.

U.S. Department of Agriculture and US Environmental Protection Agency. 1999. Unified National Strategy for Animal Feeding Operations. March 9, 1999. Available online: (<http://www.epa.gov/owm/finafost.htm>).

Van Wambeke, A., 1992. *Soils of the Tropics: Properties and Appraisal*. McGraw-Hill, New York.

Warkentin, R.P., 1992. Manejo de Andisoles relacionado con su estructura. *Suelos Ecuat.* 22 1, 9–15.

Van Dam, J., Kooman, P.L., Struik P.C.1996. Effects of temperature and photoperiod on early growth and final number of tubers in potato (*Solanum tuberosum* L.) . *Potato Research* 39: 51-62.

Villamil, J. H. (2005). “Fisiología de la nutrición en papa”. En: Primer Taller Nacional sobre los Suelos, Fisiología y Nutrición Vegetal en el Cultivo de la Papa. Bogotá. Colombia. P: 28-36.

Whischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion loss—a guide to conservation planning. *USDA Agric. Handb*, vol. 537. U.S.Gov. Print. Office, Washington, D. C.

Zehetner, Franz; William P. Miller. 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena*: 65: 201 – 213.

2008 AÑO INTERNACIONAL DE LA PAPA

Seminario de Divulgación Técnica y Avances de Investigación

Bogotá, D.C. , Julio 15-17 de 2008

Organizadores: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Departamento de Ciencias Agronómicas, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Geociencias Facultad de Ciencias, Departamento de Agronomía de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de Palmira, Instituto de Biotecnología (IBUN); Comité Técnico Cadena de la Papa Regional Antioquia; CORPOICA: Centro de Biotecnología y Bioindustria, Mosquera y Centro de Investigación La Selva.

Coordina: Sonia Jaramillo Villegas. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. sjaramal@unal.edu.co

Dirigido a: Miembros de la Cadena Agroalimentaria de la papa, investigadores, profesores universitarios, profesionales vinculados al cultivo y su industria, agricultores de avanzada y estudiantes de último nivel de Ingeniería Agronómica, Ingeniería Agropecuaria y Agronomía.

Lugar: Universidad Nacional de Colombia, Auditorio Alfonso López Pumarejo. Cr 45 N° 26-85. Edificio Uriel Gutiérrez. Bogotá

Fecha: Julio 15-17 de 2008

Entrada libre previa inscripción y reserva del cupo, el cual es limitado a la capacidad del auditorio (300 personas).

Inscripciones e información: sjaramal@unal.edu.co, lhgonzal@unal.edu.co, dmramir1@unalmed.edu.co Departamento de Ciencias Agronómicas. Tel fax (4) 4309100

Justificación: La papa es la actividad agrícola más importante de clima frío, con cerca de 150.000 hectáreas sembradas y una producción anual de 2,8 millones de toneladas. El cultivo genera cerca de 85.000 empleos directos y vincula alrededor de 100.000 familias dispersas en 250 municipios.

La cadena Agroalimentaria ha adelantado un proceso organizado de investigación, buscando alternativas de sostenibilidad del sistema productivo y la modernización del subsector. Es por ello que se considera prioritario socializar los resultados de los últimos años e implementar así un esquema de transferencia de tecnología dirigido a la adopción de la tecnología disponible.

La coordinación de este evento está a cargo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en razón a que su Facultad de Ciencias Agropecuarias ha consolidado un grupo de investigación multidisciplinario e interinstitucional de investigadores, quienes teniendo en cuenta los lineamientos de la cadena, han ejecutado una destacada serie de programas y proyectos financiados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

PROGRAMA

Martes 15 de Julio. Sesión Suelos y Fisiología del cultivo

8:00 - 8:15 a.m. Saludo de bienvenida. Doctor Rafael Molina, Vicerrector de Investigaciones, Universidad Nacional de Colombia.

8:15 - 8:45 a.m. Situación actual y perspectivas de la cadena de la papa. Doctor Héctor Villarreal, Secretario Técnico del Consejo Nacional de la papa.

8:45 - 9:15 a.m. Papa, pan de la tierra. Doctora Luz Marina Vélez. Decana de Gastronomía. Colegiatura de Antioquia.

9:15 - 9:45 a.m. La papa el tesoro alto andino: Importancia y perspectivas frente al TLC y el desarrollo agrícola rural. Doctora Sonia Jaramillo. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

9:45 - 10:15 a.m. Café

10:15 - 11:00 a.m. Características generales de clima y suelos de las zonas paperas en Colombia, con énfasis en Antioquia. Doctor Hernán González. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

11:00 - 11:30 a.m. El modelo de investigación utilizado en el Centro Experimental Paysandú en manejo de fertilidad y patosistemas en papa. Doctor Hernán González. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

11:30 - 12:00 m. Avances de investigación en papa criolla *Solanum phureja* en el departamento de Antioquia. Doctores Gloria Navas, Álvaro Tamayo y José Luis Zapata. CORPOICA.

12:00 - 12:30 p.m. Biología y manejo de *Rhizoctonia solani*. Doctora Alba Marina Cotes. CORPOICA

12:30 - 1:30 p.m. Almuerzo

1:30 - 2:15 p.m. Impacto ambiental del cultivo de la papa: Valoración de las pérdidas de suelo, nutrientes, pesticidas y niveles de escorrentía. Doctor Hernán González. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

2:15 - 2:35 p.m. Aspectos edáficos y nutricionales del cultivo de la papa. Doctor Raúl Darío Zapata. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

2:35 - 2:50 p.m. Análisis de las interacciones nutricionales, niveles críticos y dosificación frente a los rendimientos de papa variedad Diacol Capiro en un suelo de La Unión (Antioquia). Doctor Edison David Tabares. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

2:50 - 3:15 p.m. Análisis de las interacciones nutricionales, niveles críticos y dosificación frente a los rendimientos de papa variedad Diacol Capiro en un suelo de

Santa Rosa de Osos (Antioquia). Doctor Jairo Ríos. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

3:15 – 3:30 p.m. Análisis de las interacciones nutricionales, niveles críticos y dosificación frente a algunos parámetros de calidad industrial. Doctor Carlos Palacio. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

3:30 - 3:45 p.m. Café

3:45 - 4:10 p.m. Análisis funcional de crecimiento para la variedad Diacol Capiro. Natalia Cano. Estudiante de Ingeniería Agronómica Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. .

4:10 - 5:00 p.m. Modelos matemáticos de crecimiento de papa variedad Diacol Capiro. Doctor Diego Rojas. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Miércoles 16 de julio. Sesión Manejo Integrado de Enfermedades

8:00 - 8:30 a.m. Evaluación de la diversidad genética y patogénica de las poblaciones de *Phytophthora infestans* en Antioquia. Doctora Elizabeth Gilchrist. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

8:30 - 9:00 a.m. Caracterización genotípica y fenotípica de *P. infestans* en zonas productoras de papa en Nariño. Doctora Luz Estela Lagos. Universidad de Nariño.

9:00 - 9:20 a.m. Caracterización genética de poblaciones de *P. infestans* de solanáceas cultivadas en Nariño y Putumayo. Doctora María Fernanda Mideros. Universidad de Nariño.

9:20 - 9:40 a.m. Establecimiento de la línea base para el fenamidone en *P. infestans*. Doctora Luz Edith Argel. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Corporación de Investigaciones Biológicas.

9:40 - 10:20 a.m. Modelo del patosistema papa - *P. infestans*. Avances e investigaciones recientes. Doctor Mauricio Marín. Universidad Nacional de Colombia.

10:20 - 10:40 a.m. Café

10:40 - 11:00 a.m. Diagnóstico molecular por AFLPs para determinar sensibilidad o resistencia de aislamientos de *P. infestans* a fungicidas sistémicos. Doctor Bernardo Silva. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

11:00 - 11:20 a.m. Evaluación de clones de papa por resistencia a gota de la papa bajo las condiciones de Paysandú. Doctoras Elizabeth Gilchrist y Sonia Jaramillo. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

11:20 - 12:00 m. Mejoramiento de papa con base en el conocimiento del patógeno *P. infestans*. Doctor Juan Gonzalo Morales. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

8:30 - 9:00 a.m. Observaciones sobre liberación de zoosporas de *Spongospora subterranea*. Doctor Edgar Beltrán. Universidad de Antioquia y Doctor Daniel Alzate. Politécnico Jaime Isaza Cadavid.

9:00 - 9:20 a.m. Interacción de micorrizas con *Spongospora subterranea* en condiciones de campo. Doctores Sonia Jaramillo, Sergio Andrés Tamayo y Andrés Felipe Restrepo. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

9:20 - 10:00 a.m. Avances sobre el desarrollo de variedades de papa mejoradas genéticamente con resistencia a *Tecia solanivora*. Doctor Diego Villanueva. Corporación de Investigaciones Biológicas.

10:00 - 10:20 a.m. Café

10:20 - 11:00 a.m. Evaluación del crecimiento y desarrollo de tres materiales de papa en tres zonas agroecológicas. Doctor Iván Valbuena. CORPOICA.

11:00 - 11:20 a.m. Efecto del virus de amarillamiento de venas (PYVV) sobre la producción de papa criolla (*Solanum phureja*) variedad Guaneña en dos tipos de suelo. Yuly Andrea Fontecha. Estudiante de Ingeniería Agronómica. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

11:20 - 12:00 m. Análisis de la evolución de los costos de producción de papa variedad Parda Pastusa en el Altiplano Cundiboyacense. Doctores Pedro David Porras. FEDEPAPA y Héctor Villarreal. Consejo Nacional de la Papa.

12:00 - 12:20 p.m. Conclusiones y recomendaciones.

12:20 - 1:00 p.m. Clausura. Doctor Augusto Del Valle. Gerente FEDEPAPA.

1:00 - 1:10 p.m. Entrega de certificados de asistencia.