



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS

DINÁMICA DE LA FIJACIÓN DE FÓSFORO Y LA INHIBICIÓN
DE ESTA POR MEJORADORES BIOFISICOQUÍMICOS EN SUELOS
CAFETALEROS DE SOCONUSCO, EDO. DE CHIAPAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTORA EN CIENCIAS (BIOLOGÍA)
P R E S E N T A
M.en C. SILVIA GUADALUPE RAMOS HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. DAVID FLORES ROMÁN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM. Mi profundo agradecimiento por haber hecho posible mi formación profesional y un gran reconocimiento por ser la más importante Institución Pública de excelencia en Educación Superior del país y una de las mejores del mundo. Me llevo siempre el orgullo una de ser egresada de esta máxima casa de estudios.

A la Facultad de Ciencias y al Laboratorio de Edafología del Departamento de Biología. Por haber albergado mis años de duro esfuerzo y trabajo para lograr los objetivos y metas alcanzadas, brindándome las habilidades y conocimientos científicos de la más alta calidad. Con gratitud, a los académicos, administrativos y técnicos de esta Facultad que contribuyeron a mi formación.

A mis profesores de la Facultad de Ciencias y del Posgrado de la UNAM, a quienes reconozco su excepcional calidad profesional y humana, al transmitirme todas sus enseñanzas y conocimientos a lo largo de toda mi trayectoria de estudios.

Al Instituto de Geología de la UNAM, por la beca otorgada durante los estudios del posgrado, lo que permitió formarme en la investigación.

Al CONACYT, por la beca obtenida para el doctorado, sin la cual no hubiese sido posible el logro completo de los objetivos alcanzados.

Deseo hacer un agradecimiento especial a las autoridades del Ejido 11 de Abril, que me brindaron todas las facilidades para realizar el experimento en la Finca San Jerónimo durante los cinco años en que se estableció el trabajo.

A LOS MIEMBROS DEL JURADO

Deseo expresar un profundo agradecimiento y reconocimiento a los miembros del Jurado. Les expreso mi admiración por sus brillantes trayectorias académicas y de investigación, por lo que me siento muy orgullosa de haber tenido el privilegio de contar con sus valiosas asesorías durante el trabajo de investigación, así como por el apoyo, orientación y comentarios sobre el escrito final de la tesis, las cuales dieron mejor claridez y objetividad a los conceptos vertidos en ésta.

Dr. David Flores Román, investigador del Instituto de Geología de la UNAM, Director de la tesis. Con un profundo agradecimiento por su incondicional apoyo personal, su paciente asesoría y su respaldo académico para la conclusión de la tesis.

Dr. Ignacio Méndez Ramírez, investigador del IIMAS. Le estoy profundamente agradecida por el apoyo estadístico y sus valiosos comentarios a la tesis.

Dra. Georgina Fernández Villagómez, investigadora del Instituto de Ingeniería. Le agradezco profundamente por todo su apoyo y asesoría durante la realización de la tesis y por haberme apoyado a la realización de los análisis químicos de elementos menores y por sus pacientes y valiosos comentarios al escrito de la tesis.

Dra. Teresa Reyna Trujillo, investigadora del Instituto de Geografía. Le estoy muy agradecida por sus orientaciones, sus valiosos comentarios y su apoyo moral para la conclusión de la tesis trabajo.

Dr. Julio Homero Campo Alves, investigador del Instituto de Ecología. Muchas gracias por su paciencia, apoyo, interés y observaciones en el escrito final de la tesis.

Dra. Ma. Aurora Armienta Hernández, investigadora del Instituto de Geofísica. Muchas gracias por todo su apoyo, sus orientaciones, su confianza y comentarios al trabajo realizado.

Dr. Servando de la Cruz Reyna, investigador del Instituto de Geofísica. Le agradezco enormemente todo su apoyo, interés en el trabajo y por sus valiosos comentarios a la tesis.

También deseo hacer mención al Dr. José López García, del Instituto de Geografía y la Dra. Hilda Flores, del Instituto de Biología, por sus valiosas aportaciones, apoyo académico y aportaciones para llevar a cabo el examen predoctoral.

DEDICATORIA

Dedico este logro alcanzado a mi familia.

A mi querido esposo Miguel Angel Casas Mota

A mis queridos hijos, Ana Silvia Casas Ramos y Miguel Angel Casas Ramos

La culminación de esta etapa tiene un gran significado. Lo he realizado con ustedes, con todo lo que implica, y han procurado que en todo momento siempre este lleno de comprensión, apoyo, compañerismo, de amor y de alegría, fortalezas y paciencia.

Por todo ello, les agradezco y les amo todavía más.

Anita y Migue, espero imprimirles en sus vidas, la pasión por el conocimiento, por el descubrimiento de nuevos horizontes, el explorar y desafiar otras rutas y caminos en la vida, muchas veces llenos de obstáculos y espinas, pero cuando se transita en el camino del amor, de alegría, optimismo, de la comunicación, con paciencia, y Fe en Dios, esos obstáculos se convierten en terreno suave y fértil para crecer las ideas, los proyectos y convertir en realidad nuestras aspiraciones.

Así, querida familia gracias por contar con ustedes para todo, gracias por la felicidad que me brindan constantemente.

Querido esposo, hijos de mi alma este logro es de ustedes.

Continuemos juntos con esta maravillosa aventura que es la vida.

Mi vida y mi realización es completa con ustedes.

A la memoria de mis queridos y amados padres

Mario Ramos López

Inesita Hernández Cabrera

Porque hemos honrado y seguiremos poniendo en alto sus nombres. Gracias por su ejemplo de valor y pasión ante la vida, por transmitirnos la fé en Dios, por su amor, por haber sembrado en mí el fuerte deseo de la superación y sembrar la semilla del conocimiento, y por darnos la certeza de una vida mejor.

Con mucho cariño también a mis hermanos: Gabriel, Eduardo, Mónica, Margarita y David, porque los amo.

A mis queridos cuñados Helia y Julián. Con mucho agradecimiento y cariño por todo lo que han contribuido y significan para mi.

Gracias a Dios

CONTENIDO

Página

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE CUADROS

RESUMEN

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1

CAPITULO 2

REVISIÓN DE LITERATURA

7

2.1

IMPORTANCIA DE LOS GEOAMBIENTES VOLCÁNICOS DEL SOCONUSCO EN EL DESARROLLO SUSTENTABLE DE CHIAPAS

7

2.1.1

La región Soconusco

8

2.1.2

La zona cafetalera del Soconusco

10

2.2

BIODIVERSIDAD DE LA REGIÓN VOLCÁNICA DEL TACANÁ.

11

2.3

ECOLOGÍA DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS

12

2.3.1 LOS SUELOS VOLCÁNICOS

15

2.3.1.1 Clasificación de Andisoles según Soil Survey Staff (USA, 1992) y WRB (1998)

17

2.3.2 FIJACIÓN DE FÓSFORO. UN PROBLEMA EDAFO ECOLÓGICO DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS

20

2.3.2.1 Composición mineralógica

20

2.3.2.2 Propiedades del alófano

22

2.3.2.3 Reacciones con aniones

23

2.3.2.4 Propiedades físicas

23

2.3.2.5 Propiedades químicas

24

2.3.2.6 Fijación de fósforo

24

2.3.3 EL CAFETO: ORIGEN, TAXONOMÍA Y MORFOLOGÍA

27

2.3.3.1 Reacciones con aniones

27

2.3.3.2 Propiedades físicas

31

2.3.3.3 Mucílago

33

2.3.3.4 Pergamino

33

2.3.3.5 Café oro

34

2.3.4 RELACIÓN ECOLÓGICA SUELO-PLANTA-PRODUCTIVIDAD DEL CAFÉ

37

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo receptoral.

NOMBRE: RAMOS HERNANDEZ

SILVA GUADALUPE

FECHA: 6 ABRIL 2006

FIRMA: 

2.3.5	LOS MACRO Y MICRONUTRIMENTOS EN LA NUTRICIÓN MINERAL DEL CAFETO	46
2.3.5.1	Macro y micronutrientos	47
2.3.5.1.1	Nitrógeno	49
2.3.5.1.2	Fósforo	51
2.3.5.1.3	Potasio	55
2.3.5.1.4	Calcio	56
2.3.5.1.5	Magnesio	57
2.3.5.1.6	Micronutrientos	58
2.3.6	FERTILIZACIÓN MINERAL Y ORGÁNICA EN SUELOS CAFETALEROS	59
2.3.6.1	La fertilización mineral	59
2.3.6.2	La fertilización orgánica	60
2.3.6.3	La fertilidad de suelos y el cultivo del café	62
2.3.7	FERTILIZANTES FOSFATADOS Y ROCA FOSFÓRICA EN SUELOS DE ANDO	67
2.3.7.1	Los fertilizantes fosfatados	67
2.3.7.2	Los superfosfatos	69
2.3.7.3	Roca fosfórica	70
2.3.7.4	Manejo del fósforo	73
2.3.8	EL RETO DE LA SUSTENTABILIDAD EN EL AGROECOSISTEMA CAFETALERO DE MÉXICO	75
2.3.8.1	El café en el mundo	75
2.3.8.2	El café en México	78
2.3.8.3	El café en el Estado de Chiapas	79
2.3.8.4	La crisis del café	80
2.3.8.5	La sustentabilidad/sostenibilidad en el agroecosistema cafetalero	81
CAPITULO 3	OBJETIVOS	85
CAPITULO 4	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	87
4.1	LOCALIZACIÓN	87
4.2	GEOLOGÍA	87
4.3	CLIMA	89
4.4	VEGETACIÓN	91
4.5	EDAFOLOGÍA	95
4.6	USO DEL SUELO	98
CAPITULO 5	MATERIALES Y MÉTODOS	99
5.1	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO	99
5.2	DENSIDAD DE SIEMBRA	103
5.3	FERTILIZANTES INORGÁNICOS Y ORGÁNICOS EMPLEADOS	103
5.4	ÉPOCAS DE APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DURANTE EL AÑO	104

5.5	CÁLCULO DE LOS FERTILIZANTES Y ABONO ORGÁNICO	108
5.6	MUESTREOS	109
5.7	ANÁLISIS DE LABORATORIO	110
CAPITULO 6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	113
6.1	ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS DONDE SE REALIZÓ EL EXPERIMENTO	113
6.2	CONCENTRACIÓN DE P EN EL SUELO	115
6.2.1	VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN EL SUELO	118
6.2.2	EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN EL SUELO	120
6.3	CONCENTRACIÓN DE P EN HOJAS DE CAFÉ	127
6.3.1	VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN HOJAS DE CAFÉ	130
6.3.2	EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN HOJAS DE CAFÉ	132
6.4	CONCENTRACIÓN DE P EN PULPA DE CAFÉ	139
6.4.1	VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN PULPA	143
6.4.2	EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN PULPA DE CAFÉ	144
6.5	CONCENTRACIÓN DE P EN CAFÉ ORO	149
6.5.1	VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN CAFÉ ORO	153
6.5.2	EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN CAFÉ ORO	154
6.6	CONCENTRACIÓN DE P EN PERGAMINO DE CAFÉ	161
6.6.1	VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN PERGAMINO DE CAFÉ	164
6.6.2	EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN PERGAMINO DE CAFÉ	165
6.7	CORRELACIONES ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN EL SUELO, FOLIAR, CAFÉ ORO, PULPA Y PERGAMINO.	168
6.7.1	CORRELACIONES P SUELOS	169
6.7.2	CORRELACIONES P FOLIAR	170
6.7.3	CORRELACIONES P EN PULPA DE CAFÉ	171
6.7.4	CORRELACIONES P-CAFÉ ORO	172
6.7.5	CORRELACIONES P EN PERGAMINO DE CAFÉ	173
CAPITULO 7	CONCLUSIONES	175
CAPITULO 8	LITERATURA CITADA	177

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPITULO 1	
1. Ubicación geográfica de la Región Soconusco, en el Estado de Chiapas	1
2. Paisaje de la zona volcánica del Soconusco	2
3. Volcán Tacaná	3
CAPITULO 2	
4. Finca cafetalera en la zona del Volcán Tacaná	7
5. Mapa de ubicación geográfica de la Región Soconusco	8
6. Vista de la Zona cafetalera	9
7. Finca cafetalera en la zona del Soconusco	13
8. Cafetal con sombra	13
9. Distribución global de Andisoles	15
10. Volcanes activos de México	16
11. Cafetal con sombra	27
12. Frutos verdes del cafeto	27
13. Frutos maduros del cafeto	28
14 y 15. Recorrido de la semilla hasta su establecimiento en plantación	29
16. Procesos de producción del cafeto: plantación, floración, frutos verdes y frutos maduros	30
17 y 18. La cosecha de café es manual y se utilizan canastos atados a la cintura	30
19 y 20. Aspectos del fruto de café maduros y el despulpado de la cereza de café	31
21. Descripción del fruto. Corte longitudinal de una cereza de café (<i>C. arabica</i>)	32
22. Aspectos del proceso del café: café maduro, café pergamino, café verde y café tostado	35
23 y 24. Una buena distribución de raíces es unción de un suelo con buenas propiedades físicas, químicas y biológicas y asegurarán una buena nutrición y fructificación	37
25. La formación del área foliar del cafeto influye en una respuesta adecuada para la producción y fructificación	38
26. Establecimiento de una plantación de café con sombra de la especie <i>Inga leptoloba</i>	39
27. Establecimiento de una plantación de café con sombra de <i>Eritrina sp.</i>	39
28. Ramas productoras de café	40
29. Hojas amarillentas con deficiencia en N	50
30. Deficiencias de P en hojas de café	53
31. Deficiencia de K	55
32. Plantas de café con deficiencias de K	56

	33. Deficiencia de Mg	57
	34. Diagrama de la posición sobre las ramas de hojas de café para los estudios foliares	65
	35. Dinámica de los fertilizantes fosfatados en el suelo	73
	36. Exportación de café por país productor	76
	37. Precios del café (otros suaves): mercado internacional	76
	38. Precios del café en el mercado de Nueva Cork	77
	39. Producción y consumo mundial de café (Millones de sacos de 60 kg)	77
	40. Distribución en la participación mundial de principales productores. México aporta el 4.8% de la producción	78
	41 y 42. Erosión de suelos en las laderas de suelos cafetaleros en el Soconusco, Chiapas	80
CAPITULO 4	43. Ubicación de la Finca San Jerónimo, Mpio. Unión Juárez	87
	44. Mapa geológico de la zona Volcánica del Tacaná	88
	45. Distribución de la Precipitación en la Finca San Jerónimo, Mpio. Unión Juárez, Chiapas	90
	46. Distribución de las temperaturas en la Finca San Jerónimo, Mpio. de Unión Juárez, Chiapas	90
	47. Finca cafetalera, transformación del medio para el cultivo de café	94
	48. Árboles de sombra del género <i>Inga sp.</i> para el cafeto	94
	49. Hojarasca y materia orgánica del cafetal	95
	50. Perfil del suelo andisólico de la Finca cafetalera de San Jerónimo, Mpio. Unión Juárez, Chiapas	97
CAPITULO 5	51. Esquema de la distribución en campo de los tratamientos. Finca San Jerónimo, Mpio. Unión Juárez, Chiapas	99
	52. Aspecto del lote experimental en la Finca San Jerónimo, Mpio. de Unión Juárez, Chiapas. Los cafetos experimentales fueron pintados en su base con agua de cal	102
	53. Aplicación de los tratamientos en forma circular a 30 cm de distancia al tronco de los cafetos	106
	54. Aplicación del tratamiento 18 20 12 SFT	107
	55. Aplicación del tratamiento 18 00 12 RF	107
CAPITULO 6	56. Perfil del Andisol representativo de la zona donde se realizó el experimento	114
	57. Contenido de P en el suelo con los tratamientos estudiados	116
	58. Contenido de P en los suelos en las cuatro épocas del año en los tratamientos estudiados	118
	59. Promedio de los contenidos de P en los suelos después de cinco años de observación	120
	60. Contenido de P en el suelo por épocas (mayo, junio, septiembre y diciembre) durante cinco años. Abajo de cada tratamiento se señala el nivel de significancia	121

61. Contenido de P en los suelos durante cinco años de observación. Abajo de cada tratamiento se presenta el nivel de significancia	122
62. Respuesta global de los tratamientos durante los cinco años de aplicación en el suelo	123
63. Efecto de los tratamientos en el contenido de P foliar en plantas de café	128
64. Comportamiento del P a nivel foliar durante las épocas de muestreo por año	130
65. Efecto del contenido de P a nivel foliar en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo	132
66. Contenido de P foliar por épocas (mayo, julio, septiembre y diciembre) y los tratamientos. Debajo de cada tratamiento se señala el nivel de significancia	134
67. Contenido de P a nivel foliar durante cinco años de observación. Debajo de cada tratamiento se muestra el nivel de significancia	135
68. Respuesta global de los tratamientos durante los cinco años de aplicación en el nivel foliar	136
69. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pulpa de café	141
70. Comportamiento del contenido de P en pulpa de café durante dos épocas de corte (septiembre y diciembre) y muestreo por año	143
71. Comportamiento del contenido de P en pulpa de café en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo	145
72. Contenido de P en pulpa de café en dos épocas de cosecha (septiembre y diciembre) y efecto de tratamientos Debajo de cada fórmula de tratamiento se anotan los niveles de significancia	146
73. Respuesta global del P en la pulpa de café, por el efecto de los tratamientos durante los cinco años de aplicación	148
74. Efecto de los tratamientos en el contenido de P en café oro	150
75. Comportamiento del contenido de fósforo en café oro durante dos épocas de corte y muestreo por año	153
76. Efecto del contenido de P en café oro en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo	155
77. Contenido de P en café oro en dos épocas de cosecha (septiembre y diciembre) y efecto de tratamientos. Debajo de cada fórmula de tratamiento se observa los niveles de significancia	155
78. Contenido de P en café oro durante cinco años de tratamientos. Debajo de cada tratamiento se muestra el nivel de significancia	156
79. Respuesta global de los tratamientos durante los cinco años de aplicación en café oro	158
80. Efecto de los tratamientos en el contenido de P en pergamino de café	162

81. Comportamiento del contenido de P en pergamino de café durante dos épocas de corte y muestreo por año	164
82. Efecto del contenido de P en pergamino de café en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo	165
83. Respuesta global de los tratamientos durante los cinco años de aplicación en pergamino de café	167

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
CAPITULO 2	
1. Superficie Con café por municipios en el Soconusco	10
2. Composición química de la pulpa de café	32
3. Composición química del mucílago	33
4. Composición química del pergamino de café	34
5. Comparación de los componentes del café en frutos maduros, café oro y cenizas de la semilla del café	34
6. Composición química de subproductos del café	35
7. Proporción relativa en % de los subproductos de la cereza de café	36
8. Subproductos obtenidos en el proceso de beneficio de un kilogramo de café en cereza	36
9. Contenido de nutrimentos en 7.14 ton de café en cereza madura (<i>C. arabica</i>)	41
10. Requerimiento de nutrimentos por cafeto de tres años de edad (<i>C. arabica</i>)	42
11. Contenido de macronutrimentos extraídos en 1,000 kgs café oro	43
12. Niveles "normales" de nutrimentos minerales en hojas de <i>Coffea arabica</i> para diferentes países, de acuerdo a varios autores	47
13. Ámbito de la composición mineral del cuarto par de hojas del cafeto (<i>C. arabica</i> L.) en distintos países. Datos expresados en base seca	48
14. Valores de nutrimentos N P K, en hojas de cultivares de café Mundo Novo, Bourbon y Caturra en suelo podzólico de Brasil	48
15. Nutrimentos en hojas de café Mundo novo en relación a las épocas de muestreo	49
16. Valores indicativos del estado del fósforo en análisis de tejidos del café	54
17. Composición química de la pulpa de café (% en base seca).	61
18. Propiedades químicas de suelos cafetaleros de alta y baja fertilidad	62
19. Niveles bajos, medios y altos de P para algunos suelos de varios países cafetaleros	63
20. Composición de algunos materiales fertilizantes fosfatados	67
21. Condiciones de uso y aplicación de fósforo en Kenya	68
22. Respuesta a fuentes de fósforo por cafetos cultivados en suelos de "Cerrado" Brasil, en experimentos en macetas	68
23. Diagrama mostrando el análisis aproximado de una muestra de roca fosfórica	71

CAPITULO 5	24. Croquis del sitio experimental, arreglo y distribución al azar de los tratamientos	100	
	25. Descripción de tratamientos y dosis de fósforo aplicados en la parcela experimental	100	
	26. Cuadro de repeticiones y cafetos experimentales en el lote de trabajo de la Finca San Jerónimo, Mpio. de Unión Juárez, Chiapas	103	
	27. Tratamientos: fertilizantes orgánicos e inorgánicos empleados y dosis aplicadas anualmente	104	
	28. Distribución y aplicación anual de los tratamientos	105	
	29. Labores culturales desarrolladas en el cultivo de café	105	
	30. Épocas de muestreos	109	
	CAPITULO 6	31. Análisis físicos y químicos de los suelos Andisólicos de la Finca Cafetalera San Jerónimo, Municipio de Unión Juárez, Chiapas	113
		32. Análisis de varianza	115
		33. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo en los suelos	116
34. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo en los suelos de las diferentes épocas de aplicación		119	
35. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos, contenidos de fósforo en los suelos y efecto acumulativo a través de los cinco años de aplicación		120	
36. Análisis de varianza		127	
37. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo foliar en plantas de café		129	
38. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo foliar en las diferentes épocas de aplicación		131	
39. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo a nivel foliar a través de los cinco años de aplicación		132	
40. Análisis de varianza		139	
41. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pulpa de café en cinco años de aplicación		141	
42. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo en pulpa de café a través de los cinco años de aplicación		144	
43. Análisis de varianza		149	
44. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo en café oro en plantas de café		151	
45. Comparación de medias de los tratamientos en café oro en dos épocas: septiembre y diciembre		154	

46. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo en café oro en los cinco años de aplicación	154
47. Análisis de varianza	161
48. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo en pergamino de café	163
49. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo en pergamino de café en las diferentes épocas de aplicación	164
50. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de fósforo en pergamino de café en los cinco años de aplicación	165
51. Correlaciones por pares de variables	168

RESUMEN

DINÁMICA DE LA FIJACIÓN DE FÓSFORO Y LA INHIBICIÓN DE ESTA POR MEJORADORES BIOFISICOQUÍMICOS EN SUELOS CAFETALEROS DEL SOCONUSCO, EDO. DE CHIAPAS

Los suelos de la zona cafetalera del Soconusco, Estado de Chiapas, tienen un origen volcánico, derivado de la intensa actividad volcánica que en su pasado histórico ha tenido por el Volcán Tacaná, el cual ha generado junto con otros factores formadores de suelos como el clima y la vegetación a la formación de Andisoles, con el desarrollo de características físicas y químicas propias.

Para estudiar y evaluar el papel del fósforo y la problemática en estos suelos y el cultivo de café, se estableció una parcela experimental durante cinco años, en la Finca San Jerónimo del Municipio de Unión Juárez Estado de Chiapas, con el objetivo de analizar la relación del fósforo en suelos volcánicos andisólicos cultivados con café, usando diferentes fuentes y dosis de fósforo.

Se aplicaron 10 tratamientos con dos fuentes fosfatadas: superfosfato triple (SFT) y roca fosfórica (RF), así como un tratamiento con abonamiento orgánico y el testigo, para conocer las interacciones de estas sobre el cultivo de café (*Coffea arabica*) en la parcela experimental, evaluadas durante muestreos en cuatro épocas del año (mayo, julio, septiembre y diciembre) en la que se analizaron los efectos de la absorción de fósforo sobre: nivel foliar, café oro, pulpa y pergamino.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza con la Prueba de Tukey para detectar posibles diferencias significativas entre las medias de los tratamientos y contenidos de fósforo tanto en suelos como en los subproductos de las plantas de café.

Los resultados de los experimentos pueden resumirse como sigue:

Los niveles ascendentes de fósforo aplicados tanto con los tratamientos de SFT como con RF incrementaron significativamente los niveles de P en el suelo, cuyas medias al final de los cinco años del experimento fueron de 5.0 ppm para el testigo hasta 46.29 ppm para los tratamientos con RF y 40.86 ppm con ST, siendo altamente significativos.

La fuente soluble de fósforo empleada (SFT) fue altamente eficiente para elevar los niveles de fósforo, sin embargo la roca fosfórica utilizada fue capaz de igualar los contenidos altos de P en los suelos y se reflejó también en el nivel foliar, café oro, pulpa y pergamino del café, además la RF presentó un efecto residual en suelos mucho mayor que la fuente soluble (SFT), lo que concuerda con varios autores que señalan la importancia del uso de la RF como una fuente de fósforo por el efecto residual que resulta adecuada en suelos volcánicos, ya que éste se va liberando conforme a las necesidades de la planta. Adicionalmente se mejoran otras características del suelo, como el pH. En contraste el P de

la fuente soluble (SFT), pasa rápidamente a formas insolubles por la alta fijación de P en estos suelos, por lo que la RF se señala como recomendable para cultivos perennes y en suelos altamente fijadores de fósforo.

La aplicación de los tratamientos con abono orgánico, evaluados a través de los contenidos de P en los niveles suelo, foliar, pulpa, café oro y pergamino de café no fueron significativos, cuyas medias solo llegaron a niveles de 15.36 ppm, nivel considerado bajo para estos suelos, mientras que en el nivel foliar, el contenido fue de 0.139%, en pulpa 0.162%, en café oro 0.147% y en pergamino 0.052%, valores también considerados bajos para el café.

Las medias de los tratamientos en los subproductos del café (foliar, pulpa, café oro y pergamino), fueron significativos estadísticamente, con los tratamientos que emplearon dosis medias a altas de P, cuyos análisis químicos mostraron niveles altos: 0.20% para el nivel foliar, 0.24% para el nivel en pulpa, 0.237% para café oro y 0.078 % para pergamino.

Se encontraron correlaciones positivas entre el fósforo del suelo, foliar, café oro, pulpa y pergamino, siendo el mayor en el de café oro.

Las medias de los tratamientos testigo y los que se emplearon con dosis bajas de fósforo (ST y RF), no tuvieron efecto significativo sobre las variables de estudio, por lo que concuerda con numerosas investigaciones realizadas sobre estos tipos de suelos, en los que se señala la alta deficiencia en fósforo y la necesidad de aplicación de dosis y fuentes apropiadas para contrarrestar esta condición desfavorable de los suelos volcánicos.

Se señala la importancia de los contenidos de fósforo en las partes de la planta de café analizadas, foliar, café oro, pulpa y pergamino. Específicamente es ampliamente conocido la importancia de un nivel de suficiencia de P a nivel foliar por su relación para las etapas fisiológicas de floración y fructificación. En el caso del experimento, los máximos niveles foliares se obtuvieron con las máximas dosis de tratamientos de ST y RF empleados.

En cuanto al fruto de café analizado en los subproductos, café oro, pulpa y pergamino, los máximos niveles de fósforo fueron: 0.237%, 0.244% y 0.078% respectivamente.

Se ponen de manifiesto las correlaciones metabólicas suelo-planta-café. Se comprueba la alta necesidad de P en el suelo utilizado a fin de satisfacer los requerimientos a nivel foliar y en el fruto del café, ya que en los tratamientos sin fósforo o con dosis bajas, los contenidos tanto en suelo, foliar, café oro, pulpa y pergamino, fueron bajos, no significativos estadísticamente y no satisfacen la demanda de P por la planta de café. En tanto, las dosis altas de los tratamientos fosfatados ST y RF, elevaron significativamente los contenidos tanto en suelos como en el nivel foliar, café oro, pulpa y pergamino.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El Soconusco ha sido considerado geográfica y económicamente la región más importante del Estado de Chiapas. Forma parte de una de las 9 regiones económicas de la Entidad y desde la época de la colonia ha sido estratégica en la economía de la entidad, por ser la que mayor actividad agrícola ha generado a través de los diversos productos que se han cultivado y se cultivan como café, cacao, plátano, palma africana, algodón, etc. (fig. 1). En este contexto la zona presenta una alta densidad poblacional, debido a la intensa actividad humana dedicada a las actividades que se desarrollan en la zona tanto agrícola, pecuaria, como del comercio, además de ser estratégica por ser zona fronteriza con Centroamérica.

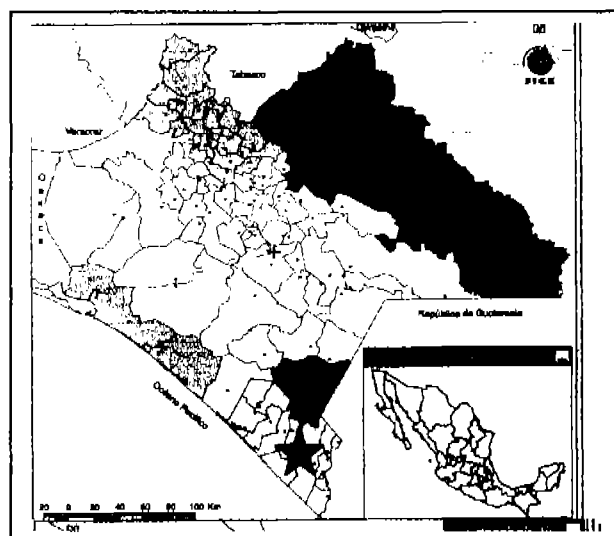


Figura 1. Ubicación geográfica de la Región Soconusco (★), en el Estado de Chiapas.
Fuente INEGI, Chiapas, (2000).

Particularmente, varios municipios de esta región como Tapachula, Unión Juárez, Cacahotán, Tuxtla Chico, por su geología, están cubiertos por productos del Volcán Tacaná e influenciado también por la actividad de los volcanes guatemaltecos (Mulleried, 1957; Helbig, 1964; Ramos, 1979; De la Cruz-Reyna *et al.*, 1989; Macías *et al.*, 2000).

En el Soconusco, los suelos volcánicos, presentan un gradiente altitudinal que va desde el nivel del mar, hasta los 4,080 m, que es la altura del Volcán Tacaná (fig. 2). En la zona comprendida entre los 700 hasta los 2000 msnm, bajo condiciones variables de clima, se presenta el cultivo de café.

Un alto porcentaje de suelos en esa región, se han desarrollado sobre depósitos antiguos de cenizas volcánicas, lahares volcánicos, depósitos piroclásticos, tobas andesíticas, aunque también se presentan suelos derivados de rocas graníticas-

granodioríticas, productos del basamento ígneo de la zona, y son en su mayor parte ácidos y deficientes en P aprovechable para la mayor parte de las plantas.

Los suelos volcánicos, clasificados por el ISSS; ISRIC; FAO, (1998); WRB (1999) dentro de la Unidad Andisol, y en la Clasificación Americana (USDA, 1999) dentro del Orden Andisol, difieren con respecto a órdenes de suelos en propiedades físicas y químicas. Los suelos volcánicos poseen características físicas relevantes apropiadas para muchos cultivos, como la textura, estructura, consistencia, densidad real y aparente, retención de humedad, y profundidad efectiva, por lo que influyen favorablemente en el comportamiento del café, pero en cuanto a sus propiedades químicas son conocidas varias problemáticas de fertilidad, especialmente en cuanto al P se refiere, ya que por sus características mineralógicas y químicas son capaces de fijar y retener grandes cantidades de este elemento y hacerlos inaccesibles para la absorción radical, tanto de P nativo, como el que se aplica como fertilizante a estos suelos, por lo que esta problemática, junto con otros problemas de pH y susceptibilidad a la erosión de estos suelos, son considerados críticos para el manejo de la fertilidad en la mayoría de las regiones cafetaleras del mundo (Valencia, 1998).

Estas características que son propias en estos suelos, se debe, más específicamente a la presencia de minerales silicatados amorfos y fácilmente intemperizables de los materiales volcánicos, lo que determina a su vez varias de sus características físicas, químicas y biológicas, pero sobresale particularmente, la problemática del P, el cual se presenta como un factor limitante para el crecimiento normal y producción de plantas cultivadas comercialmente (Ramos, 1982; Canessa *et al.*, 1987; Zhang *et al.*, 2000; Alvarado *et al.*, 2001)



Figura 2. Paisaje de la zona volcánica del Soconusco.

En Chiapas y en el sureste de México, la zona cafetalera del Soconusco, es ampliamente conocida por la extensión y producción de café sobre sus zonas volcánicas (fig. 3).

Una gran proporción de este cultivo se lleva a cabo sobre suelos derivados de cenizas volcánicas que están produciendo muy por debajo de su capacidad potencial. Siendo el café un producto que se requiere producir en calidad y cantidad, cuando no se aplica las cantidades adecuadas de P, a través del balance NPK, no es posible lograr beneficios apreciables con el uso de las variedades mejoradas que se cultivan.

La mayoría de los suelos volcánicos, en particular los Andisoles, muestran un alto contenido de materia orgánica que oscila entre el 12 y 25 por ciento, mientras que el pH varía entre muy fuerte y moderadamente ácido, pero por el carácter mineralógico, estos presentan un alto contenido de amorfos, con cargas electropositivas, denominado alófanos, los cuales determinan la fuerte fijación del P y por tanto es usual encontrar en los suelos bajos contenidos de ese elemento el cual no es fácilmente aprovechable para las plantas (Birrel, 1964; Egawa, 1977; Forsythe, 1969; ICOMAND, 1986; Soil Survey Staff, 1992; Shoji *et al.*, 1996; Besoain *et al.*, 2000; Alvarado *et al.*, 2001).

El P, después del N, es el que más frecuentemente afecta la producción de los cultivos (Haarer, 1977; Coste, 1978; Carvajal, 1972, 1984; Muñoz, 1984; Inmecafé, 1990; Fixen, 1994; Ramírez y Bertsch, 1999; Valencia, 1998, 1999).

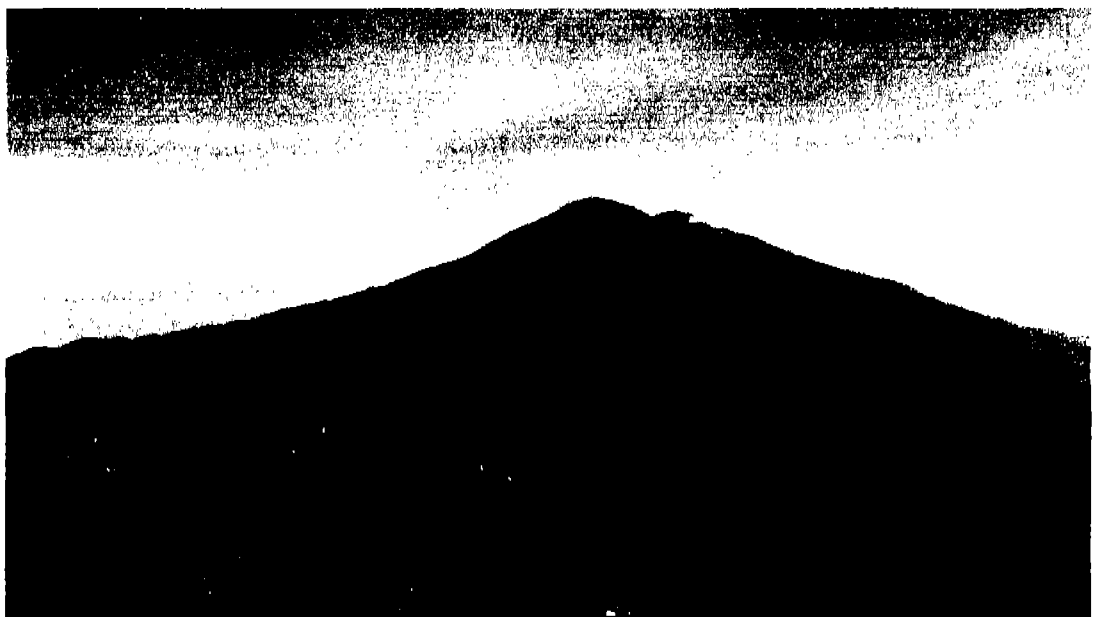


Figura 3. Volcán Tacaná.

La deficiencia del P en los suelos volcánicos es un problema de reconocida importancia en las investigaciones sobre la fertilidad en éstos. La magnitud de este problema constituye una de las limitantes de mayor trascendencia en la producción de los cultivos. La baja disponibilidad de P está asociada con: a) bajo contenido de P total; b) alta estabilidad de los compuestos fosfatados del suelo con los materiales minerales, lo que implica una baja solubilidad y por tanto, una muy débil liberación de formas disponibles a la planta, y c) baja intensidad de la mineralización de los compuestos orgánicos fosfatados. Cuando se trata de controlar la deficiencia mediante la aplicación de fertilizantes, una buena parte del mismo pasa rápidamente a formas no aprovechables para las plantas (Fassbender, 1966, 1968, 1969, 1975; Fassbender *et al.*, 1967, 1969, 1978, 1987; Alvarado *et al.*, 2001).

Esta investigación experimental, tuvo como antecedentes los estudios de taxonomía y fertilidad de los suelos del Soconusco (Ramos, 1979), los trabajos y experimentos de invernadero (Ramos, 1982, 1984), y luego, los experimentos de campo realizados durante más de cinco años sobre suelos volcánicos, lo que permitió conocer la dinámica de este elemento. En adelante se podría realizar una evaluación de las áreas que pueden mejorarse mediante fertilización fosfórica y/o abonamiento, como base para proponer y fundamentar el desarrollo de futuros programas apropiados para proteger, conservar y desarrollar tanto el cultivo del café, como el suelo que lo sustenta, a través de prácticas, manejo y una fertilización adecuada.

La importancia de esta contribución reside, en la profundización acerca del conocimiento de suelos de ando, la fijación de P, y en el análisis de todas las interacciones que suceden entre los suelos, las plantas de café, observados a través del ciclo anual del cultivo, cuyos resultados pueden impactar en un manejo sustentable y su relación con la productividad

Investigaciones como la presente, son fundamentales para una adecuada planeación en de los agroecosistemas cafetaleros. Estos, junto con información básica sobre los recursos edáficos, su fertilidad, clase y uso del suelo, su medio físico y geográfico, geología, clima, vegetación, comunicaciones e infraestructura, son básicos para elaborar y planear proyectos o programas con una seguridad máxima, con el fin de lograr un mayor aprovechamiento, lo cual finalmente coadyuvará al mantenimiento de la sustentabilidad y mejoramiento de la vida social y económica de sus habitantes.

Finalmente, hay que agregar que en la actualidad la complejidad de los procesos de la globalización en las regiones agrícolas ha puesto en crisis a las regiones cafetaleras de nuestro país, por lo que las alternativas de sustentabilidad/sostenibilidad se requieren urgentemente en los agroecosistemas cafetaleros, particularmente en zonas de origen volcánico, ya que a pesar de ser consideradas como regiones de buena fertilidad, las características físicas, químicas y biológicas de éstos, los colocan como sistemas altamente frágiles que requieren de un conocimiento científico que permita establecer las bases para impulsar programas de conservación, mejoramiento y restauración de estos recursos para un desarrollo sustentable de la zona. Por lo que, estudios e investigaciones como la presente, que contemplan la realización de trabajos de invernadero y campo, son base para futuros programas que pretendan afectar y utilizar estos recursos.

En este estudio específicamente se realizó una evaluación del P-suelo-cafeto (*Coffea arabica*), mediante la comparación de dos fuentes fosfatadas en suelos volcánicos del Soconusco, estado de Chiapas, México.

CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. IMPORTANCIA DE LOS GEOAMBIENTES VOLCÁNICOS DEL SOCONUSCO EN EL DESARROLLO SUSTENTABLE DE CHIAPAS

Los ambientes fisiográficos influenciados por la actividad volcánica, sin duda alguna han conformado en su evolución geológica, relaciones climáticas, biodiversidad, valores sociales y culturales muy peculiares que han originado geoambientes diversos de acuerdo a los pisos altitudinales y de latitud, que permiten diferenciarlos de otras zonas geológicas y de manera particular en aquellas áreas que han mantenido un vulcanismo activo en cualquier parte de México y del mundo.

Por lo anterior, es imposible hablar de la región Soconusco, sin tomar en cuenta esta influencia volcánica que ha modelado su paisaje y sus recursos en tres regiones claramente diferentes: la Planicie Costera: rica en producción de plátano, mango, papaya, aceite de palma, azúcar, cacao y ganadería; la Zona Cafetalera, desarrollada principalmente en su inicio por inmigrantes alemanes a finales del siglo XIX (fig. 4) y más adelante por ejidatarios y comuneros, mientras que la parte alta mantiene especies maderables y frutales de clima templado y frío.

Los volcanes en actividad tienen un historial de erupciones registradas que van modificando el carácter del paisaje y la fisiografía de las regiones, aunque hay que agregar que la actividad antrópica ha efectuado las mayores transformaciones debido a una gran capacidad para explotar los recursos naturales por el clima adecuado para los cultivos de estas zonas.



Figura 4. Finca cafetalera en la zona del Volcán Tacana

Los ambientes volcánicos de la Región Cafetalera del Soconusco tienen su origen geológico en el complejo de granítico cristalino del Paleozoico de la Sierra Madre y sobre ésta, los productos de la actividad del Volcán Tacaná de composición andesítica, considerado dentro de los 14 volcanes activos del país, con una altura de 4080m en cuya cúspide parte el límite natural fronterizo entre México y Guatemala (Mulleried, 1957; Helbig, 1964; Macías *et al.*, 2000).

La influencia del volcanismo en esta región, se muestra en la figura 6. De acuerdo con Macías *et al.*, (2000), este volcán parece presentar un proceso repetitivo de erupciones piroclásticas y al parecer el edificio volcánico ha sido destruido parcialmente al menos dos veces, generando emisiones de grandes cantidades de cenizas y flujos piroclásticos, incluyendo flujos masivos laháricos, seguida por la implantación de un domo y efusión de flujos de lavas.

En las últimas décadas, luego de la reactivación de 1986, el volcán Tacaná ha sido parcialmente estudiado desde el punto de vista geológico. De manera general sugieren una geología de roca andesita de hornblenda-biotita (Macías *et al.*, 2000).

Esta continúa actividad volcánica en la Región Soconusco, así como de otros volcanes cercanos a la zona, también activos y de la misma composición andesítica, como el Volcán Santa María de Guatemala, el Tajomulco, etc., son el origen de los suelos volcánicos de la región de estudio.

Los materiales volcánicos, de composición intermedia, han tenido la influencia de un clima cálido y húmedo, actuando como factores de formación de suelos y junto con la vegetación, la altitud, relieve y la topografía, han conformado a través de muchos miles y millones de años, las características físicas, químicas y biológicas propias de los suelos volcánicos.

2.1.1 La Región Soconusco

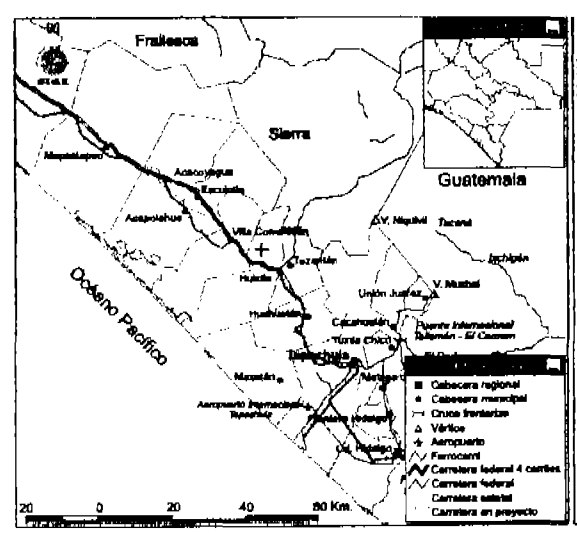


Figura 5. En color amarillo, se presenta la ubicación geográfica de la Región Soconusco, en el Estado de Chiapas. Fuente INEGI, Chiapas (2000)

En la Región Soconusco, (fig. 5), las cualidades de sus suelos han permitido desde la época de la colonia hasta nuestros días, el desarrollo agropecuario y ser la base de la actividad económica agropecuaria mas importante de Chiapas.

Comprende 16 municipios, situados en la llanura costera del Pacífico y en la vertiente del Pacífico de la Sierra Madre de Chiapas, desde Mapastepec, hasta la frontera con Guatemala. INEGI, (2001) (Fig.5).

Dentro de la economía estatal, la Región Soconusco tiene gran importancia desde el punto de vista agropecuario, el cual abarca desde el límite altitudinal superior del cultivo del café hasta la línea costera, donde existe una producción agrícola intensiva orientada a la exportación. Hacia el noroeste, el Soconusco termina donde comienza a ser dominante el uso ganadero de la tierra, a la altura de los poblados de Acacoyagua, Acapetahua y Mapastepec. Hacia el sureste su límite es la frontera con Guatemala (figura 5).

Los cultivos principales en la región Soconusco, son café, cacao, plátano, mango, maíz, frijol y papaya, con lo cual se convierte la región que aporta mayores ingresos al Estado, por volumen y valor de la producción.

Desde el punto de vista geoambiental y geoeconómica, el Soconusco a su vez puede ser dividido en tres formaciones: la planicie costera, la zona cafetalera y las partes altas de la Sierra Madre, cada una distinta por sus condiciones naturales, vegetación, clima, producción y componentes sociales (Helbig, 1964, INEGI, 2002) (fig. 6).



Fig. 6. Vista de la Zona Cafetalera

2.1.2 La zona cafetalera del Soconusco

El área cafetalera del Soconusco, aparece en forma compacta o continua desde la frontera con Guatemala hasta el municipio de Escuintla (INEGI, 2001). Los cafetales se presentan desde los 200 a 300 m de altitud hasta 1300 m en el noroeste y 1800 m en el sureste, con 74,626 ha sembradas con café (Cuadro 1). Hasta el municipio de Escuintla queda abarcada el 96% de la superficie sembrada con café.

Cuadro 1. Superficie con café por municipio en el Soconusco

Municipio	Superficie con café de productores (ha)	Superficie total de productores (ha)	Superficie con café/superficie total de productores (%)
Acacoyagua	1418	5600	25.3
Cacahoatán	7117	10239	69.5
Escuintla	7743	13457	57.5
Huehuetán	2225	4176	53.9
Huixtla	4621	6145	75.2
Mapastepec	975	7442	13.1
V.Comaltitlán	3298	4571	72.1
Tapachula	21630	24782	87.3
Tuxtla Chico	2316	3280	70.6
Tuzantán	5092	8018	63.5
Unión Juárez	3709	4112	90.2
Motozintla	14028	22622	61.9
Totales	74626	117883	63.3

INEGI, (2001).

Al ser una zona de alta producción agrícola, se reconoce como la zona con mayor densidad de población. De acuerdo datos de INEGI, 2000, se tiene 150 habitantes por km² promedio, considerado el mas elevado del Estado, la mayor parte de ellos dedicados a la cafeticultura.

Es importante destacar que a pesar de la gran transformación de los Recursos Naturales de esa Región, todavía se puede observar una presencia importante de los varios ecosistemas representativos de la gran diversidad biológica en sus pisos altitudinales, desde los 4080 msnm correspondiente a la cúspide del Volcán Tacaná, (el más alto del Sureste), hasta el nivel del mar, originando una variedad de climas y microambientes que han permitido una diversidad de cultivos. Entre ellos, destaca por la superficie empleada, el cultivo de café.

2.2 BIODIVERSIDAD DE LA REGIÓN VOLCÁNICA DEL TACANÁ

El Tacaná es un volcán binacional, ya que en su cúspide pasa la línea fronteriza México-Guatemala (fig. 3). El grupo étnico es el maya-mam que vive en sus faldas todavía y mantiene vigente las tradiciones y conocimiento de la cultura hacia las montañas.

Tacaná significa “La Casa de Fuego” en lengua mam, es un volcán activo de 4,080 msnm considerada la máxima cumbre de Chiapas y de todo el sureste del país. Este volcán forma parte de la Sierra Madre de Chiapas.

Debido a la gran importancia de la biodiversidad en la zona del Volcán, el 28 de enero del 2003, el Diario Oficial de la Federación publicó el Decreto por el cual se declara área natural protegida con carácter de Reserva de la Biosfera, comprendiendo los municipios de Tapachula, Cacaohatán y Unión Juárez en el Estado de Chiapas con una superficie total de 6,378-36-98.86 has.

La zona del Tacaná puede considerarse representativo de los diferentes tipos de vegetación que existen en Chiapas, a pesar de presentar una fragmentación significativa. La zona se caracteriza por tener una gran diversidad ecosistémica (selva altas y medianas, bosque Mesófilo, bosque de coníferas, páramo tropical y chusqueal), además de tener importancia biogeográfica en cuanto a distribución de flora. El lindero de la reserva del Tacaná, comprende un predominio de bosque Mesófilo de montaña. La selva alta perennifolia se ubica en las partes bajas y generalmente intercaladas con agricultura de temporal, cultivo de café y vegetación secundaria (Conamp, 2003)

De acuerdo a la altura del terreno sobre el nivel del mar, la selva o el bosque se pueblan de especies diferentes. En las partes bajas hay restos de selva alta que, quinientos metros más arriba, se convierten en mantos de selva de montaña y después en nubliselvas, con una gran variedad de epífitas, destacando los chusques, frailejones y orquídeas. La flora va cambiando poco a poco hasta dar paso, más allá de los dos mil metros, a zonas de pinos y encinos.

Esta zona volcánica presenta una gran diversidad altitudinal, aisladas de otras regiones volcánicas de México. Presenta altos niveles de precipitación pluvial. Las zonas alpinas y subalpinas son frecuentemente el límite septentrional de taxa andinos y es límite meridional de los taxa del norte (Miranda, 1957; Breedlove, 1981).

Cerca de la cima del Tacaná existe, además, el único páramo auténtico de la frontera mexicana del sur, ubicado a tres mil metros de altitud. Más arriba, los bosques desaparecen dando paso a grandes extensiones de matorrales y pastizales con tramos de suelo desnudo. Allí se forman escarcha y delgadas capas de hielo sobre aguas estancadas; durante el invierno, ocurren pequeñas nevadas (Breedlove, 1981).

En cuanto a la fauna silvestre existente destaca la musaraña, el ocelote, el jabalí de collar, el venado cabrito, la cotorrilla, el pajuil, el trogón tricolor, tucancillo verde, el quetzal, el pavón, el águila crestada, la mariposa de nelson y la mariposa limanópoda. Muchas de estas especies están amenazadas por la presión humana sobre sus hábitats.

No obstante lo anterior, la intensa ocupación humana sobre sus fértiles tierras para ocuparlas en las actividades agropecuarias, ha provocado una intensa transformación de la zona, al cambiar el uso del suelo con vocación forestal, a la actividad agrícola y pecuaria, desde principios del siglo pasado hasta nuestros días, dando paso a las amplias zonas de cultivos como el café, (figs. 7 y 8), cacao, plátano, etc. No obstante la importancia de estas actividades para el desarrollo económico en la región, la pérdida de capital biológico en su flora y fauna por la intensa deforestación ha causado una disminución de especies endémicas de la zona, cuyos relictos son de especial importancia para su protección y restauración.

2.3. ECOLOGÍA DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS

Los factores ecológicos (clima, suelo, vegetación, altitud, etc.) ejercen una influencia muy notable sobre el cultivo del café, hasta el punto de que no es posible su desarrollo si no se cumplen cierto número de condiciones (Coste, 1978). En las regiones cafetaleras el hombre ha intervenido los ecosistemas, transformándolo en un agroecosistema. El cafeto se ha adaptado así a ambientes diferentes, latitudes y altitudes, que junto con las variedades de café, su manejo y cuidado, han dado nombre a zonas productoras de alta calidad, como la región Soconusco, caracterizadas por cafetales en su mayoría sombreados y sobre suelos volcánicos (figs. 7 y 8).

Los suelos y los ecosistemas a los que pertenecen, desarrollan sistemas ecológicos muy complejos por la interacción de todo el ecosistema, los procesos dinámicos, la productividad primaria de los organismos vegetales y su interacción con los organismos superiores. Por la importancia de los suelos como factor edáfico en los ambientes volcánicos describiremos algunas de sus relaciones geocológicas que permiten entender los mecanismos de sus interrelaciones biofísicoquímicas.

Una importante superficie de la Región Soconusco, está caracterizada por sus suelos derivados de cenizas volcánicas. La zona montañosa fue transformada dramáticamente para darles un uso agrícola y específicamente para el impulso de la cafecultura. Sus suelos volcánicos, conocidos como fértiles por sus características físicas químicas y biológicas, desde las primeras plantaciones establecidas en el siglo pasado, pronto demostraron ser "ideales" para éste cultivo, dados los requerimientos de clima, altitud, humedad, profundidad del suelo y fertilidad de los suelos, generando pronto cafés de alta calidad reconocidos en el mercado nacional e internacional.

El cinturón altitudinal que requirieron los cafetales para prosperar varían desde altitudes de 600 hasta 1800 msnm, lugar de las selvas tropicales húmedas, caracterizadas por los regímenes de clima cálido húmedo, con lluvias de verano, precipitaciones superiores a los 2,000 mm anuales, temperaturas promedio de 22 a 26°C y un clima del tipo Af(m) o Am. (García, 1984).

En el Soconusco este cinturón ecológico, posee una intensa red de relaciones biogeoquímicas de reciclaje de nutrimentos en sus diferentes pisos altitudinales, produciendo una intensa productividad primaria en el ecosistema, ya sea en las áreas aún conservadas o en los agro ecosistemas cafetaleros, generando importantes ciclos tróficos en

estos, los cuales han influido en la formación del ambiente edáfico y las relaciones que entre éstos establecen.

En esta región considerada de alta biodiversidad, la deforestación ha sido intensa para dar lugar desde hace dos siglos al uso agrícola. Hoy día puede apreciarse solamente algunos “manchones” de la vegetación original de sus selvas altas, medianas, bosques de pino y zacatonales de las partes altas.

Solo en las últimas décadas, debido a las necesidades de conservación, protección y restauración de los recursos en dichas zonas, se comenzó con estudios de biodiversidad así como de la productividad en el agro ecosistema cafetalero. Se estableció en el año 2003 el Decreto de Zona Protegida a la zona del Volcán Tacaná (Conamp, 2003).

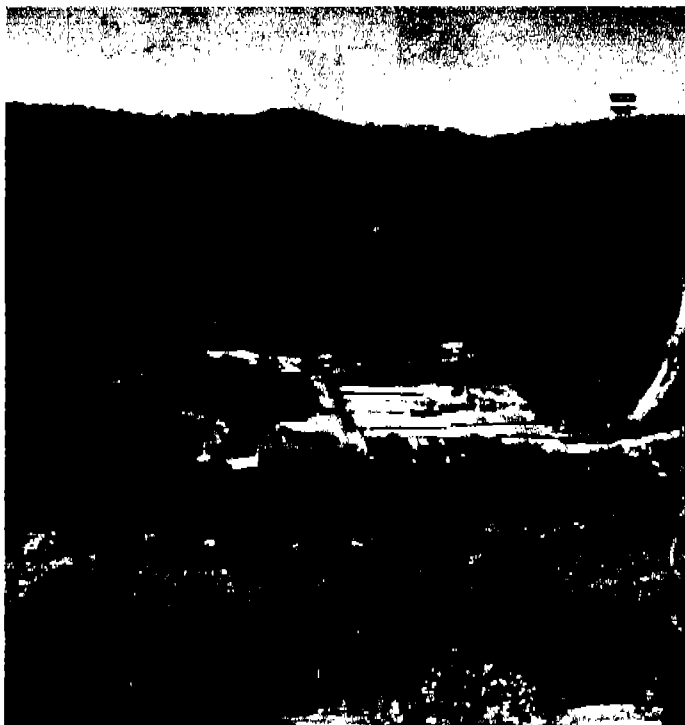


Figura 7. Finca cafetalera en la zona del Soconusco



Figura 8. Cafetal de sombra

La Región Soconusco, geológicamente está influenciada por los productos volcánicos emitidos por las erupciones del Volcán Tacaná situado en el sureste del Estado. Este Volcán forma parte de la frontera natural con Guatemala y encabeza la serie de Volcanes Centroamericanos. La mayoría de los suelos de la zona cafetalera del Soconusco, están clasificados como suelos de Ando, cuyas características físicas y químicas son conocidas, siendo notable la influencia del volcanismo del Volcán Tacaná e inclusive del volcanismo centroamericano que encabezan los volcanes Tajomulco, Sta. María y Santiaguito, de Guatemala (Ramos, 1979, 1982).

Aunque no se sabe con certeza cual fue la fecha de la última erupción, de acuerdo a investigaciones de Macías y Espíndola, (2001), la última erupción pudo haberse situado hace unos 2000 años. Hoy día es apreciable encontrar espesores de varios centímetros de cenizas en la zona de estudio, producto de la erupción del Volcán de Santa María en 1902.

No obstante este cambio, muchos de los procesos ecológicos, particularmente de los ciclos biogeoquímicos se mantienen en el Agro ecosistema Cafetalero, pues la estructura que sostienen: plantas herbáceas- cafeto-árbol de sombra, generan un eficiente reciclamiento de nutrimentos.

2.3.1 LOS SUELOS VOLCÁNICOS

En el planeta, los suelos volcánicos están representados en márgenes continentales y en islas de casi todas las regiones del mundo. Denominados Andisoles (anteriormente Ando, Andosoles y Andepts), de acuerdo al ICOMAND, 1986, representan alrededor de 0.91 millones de km² (fig. 9). Dentro de la Clasificación Americana, Soil Survey Staff, (1992), destacan que los Andisoles cubren un área aproximada de 100 millones de ha a nivel mundial, esto es el 0.84% del total de tierra del planeta. Su importancia es extrema, dado que se encuentran entre los suelos mas productivos del mundo, debido a su elevada fertilidad y capacidad de retención de agua (Soil Survey Staff, 1992; Shoji *et al.*, 1993).

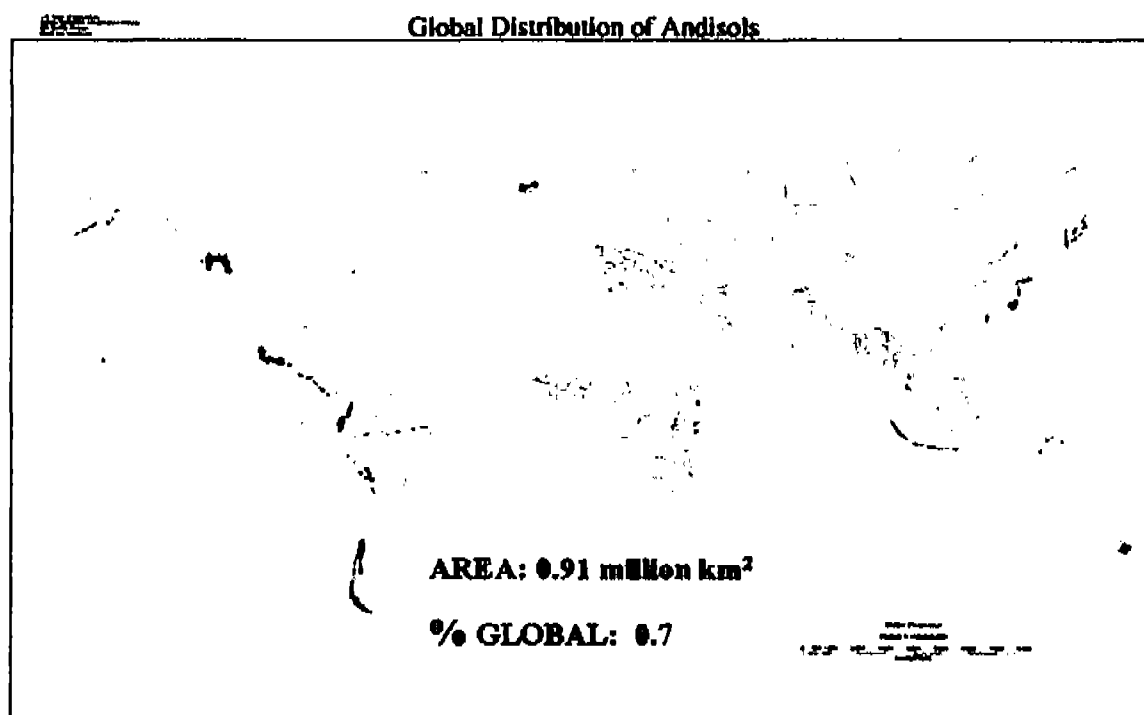


Figura 9. Distribución global de Andisoles. Fuente: ICOMAND, 1986

El vulcanismo ha representado para muchas regiones de los países que los sustentan, oportunidades para el establecimiento de una agricultura muy importante desde la época prehispánica, como en el caso de México, Centroamérica y Sudamérica. Sin embargo en algunas regiones el vulcanismo activo ha representado también riesgos y peligros para la población aledaña, como el caso de la erupción del Volcán Chichón en 1982 y la del Parícutín en 1943, los cuales transformaron el paisaje, causaron pérdidas de vidas humanas, provocaron cuantiosas pérdidas económicas y de infraestructura de esas regiones.

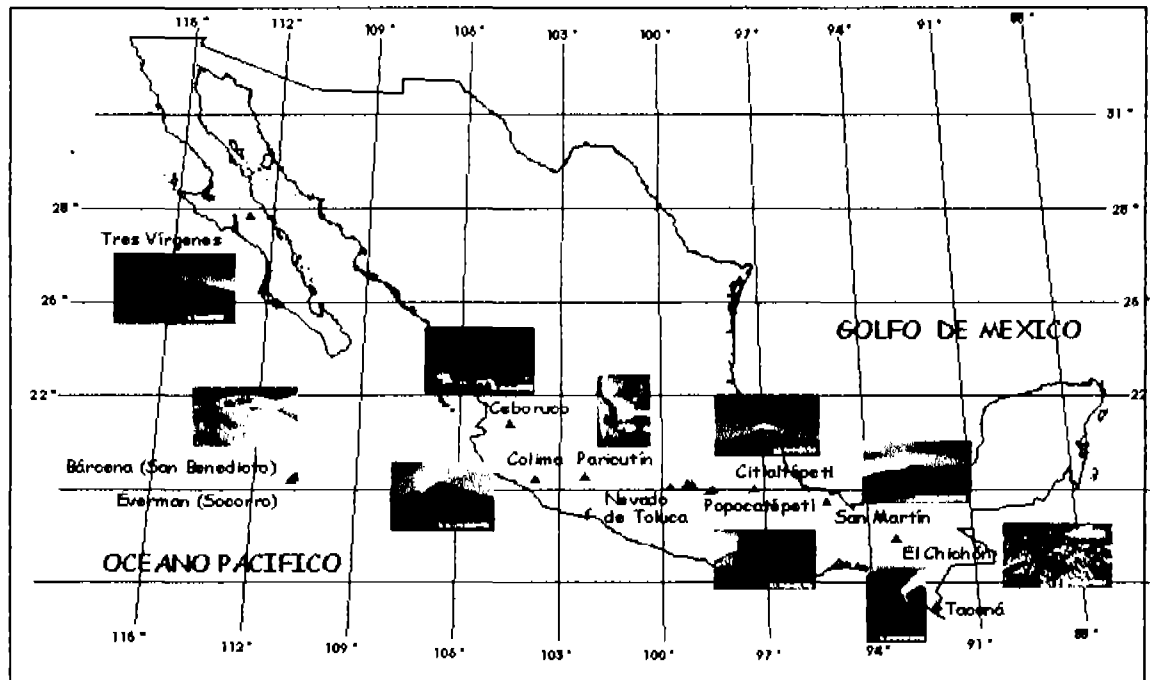


Figura 10. Volcanes activos de México. Fuente: Cenapred, (2004)

Las regiones volcánicas de nuestro país están ubicados principalmente en el Eje Neovolcánico, en las Sierras del Pacífico Mexicano y de manera extraordinaria, el vulcanismo del norte de Chiapas y las de San Martín, Los Tuxtlas, Veracruz, situado en la zona costera del Golfo de México. (Yarza, de De la Torre, 1992; Cenapred, 2004; Macías Vázquez y Capra Pedol, 2005.) (fig. 10).

En todas estas regiones se presentan suelos derivados de cenizas volcánicas, producto de la intensa actividad volcánica. Cenapred, (2004), ha catalogado 14 volcanes activos en México (fig. 10). Las emisiones de cenizas, flujos piroclásticos, lavas y otros productos volcánicos, han generado suelos volcánicos, sin embargo, no todos estos suelos están clasificados como Andisoles.

En nuestro país, Ortiz, (1981), señala que la superficie que abarca los suelos volcánicos, es de 8,373,009 ha, y que lo constituyen los andosoles ócricos (292,000 ha), andosoles húmicos (746,600 ha) y andosoles vítricos (7,334,300 ha).

Los Andisoles se presentan en diferentes tipos de climas, pero preferentemente en climas cálido-húmedos y templados y son menos comunes en climas con una estación seca prolongada y rara en climas áridos, ya que se requiere suficiente humedad para que se lleven a cabo las reacciones principales que modificarán la estructura cristalina de los minerales primarios a secundarios. Estas reacciones son de oxidación, reducción, carbonatación, hidratación, e hidrólisis.

2. 3.1.1 Clasificación de Andisoles según Soil Survey Staff (USA, 1992) y WRB (1998)

En general, bajo el nombre de suelos volcánicos o suelos de Ando, se agrupan aquellos suelos originados a partir de materiales piroclásticos y que contienen una alta proporción de cenizas volcánicas, en los cuales la fracción arcilla es dominada por material amorfo (alófano principalmente), es por ello que a éstos suelos también se les ha dado el nombre de suelos alofánicos. Estos suelos también poseen una gran afinidad por las moléculas de agua (Aguilera, 1965, 1969, Alcalá *et al.*, 2001, Alvarado *et al.*, 2001).

Nombres tales como Andosoles o Andisoles hacen referencia a suelos originados a partir de material volcánico. No todos los suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos son Andosoles o Andisoles. Entre estas propiedades se puede destacar su alto contenido en materia orgánica, alta porosidad (60-80%), baja densidad aparente, gran capacidad de retención de agua y la formación de microagregados estables. Tales características pueden explicarse en base al alto contenido en hidróxidos de Fe y Al y a la estructura que las arcillas alófanas presentan en estos suelos: esférulas huecas que permanecen discretas a humedades altas (FAO-UNESCO-ISRIC, 1988; FAO, 1991; Soil Survey Staff, 1992; ISSS, ISRIC y FAO, 1994; FAO-ISRIC-SICS, 1998).

Los suelos volcánicos estuvieron clasificados dentro del orden de los Inceptisoles, suborden Andepts. Debido a las particulares propiedades de los suelos derivados de material volcánico se decidió agrupar a todos los suelos con propiedades Ándicas dentro del nuevo orden denominado Andisoles (ICOMAND, 1986). La fracción arcilla <0.002 mm de los Andisoles está dominada por alófana y/o imogolita proveniente de la meteorización de materiales piroclásticos producto de deposiciones recientes. Por otro lado es también evidente la presencia de suelos no alofánicos con alto contenido de humus que también tienen propiedades ándicas (Shoji y Fujiwara, 1984, cit por Espinosa, 1991, Soil Survey Staff, 1992).

Con respecto a la clasificación de los suelos volcánicos, en la actualidad se cuenta con un moderno sistema cuantitativo de clasificación de suelos, la taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 1999), y la Base Mundial de Referencia de Suelos del Mundo (FAO/ISRI/ISSS, 1998) que cuentan con una leyenda cartográfica de suelos de alcance mundial que permiten identificar sus diferentes tipos de acuerdo con sus propiedades intrínsecas.

Los diversos trabajos efectuados sobre suelos de Ando han revelado una serie de problemas, entre los que destacan su capacidad de fijación de P, lo que en muchos casos causa dificultades para el buen aprovechamiento de los cultivos (Ramos, 1982, 1984, Alvarado *et al.*, 1985, 1982, Shoji *et al.*, 1993, Besoain *et al.*, 2000, Borie *et al.*, 2003).

La mayoría de los suelos volcánicos se presentan en regiones cercanas a sitios de efusión piroclástica, de cenizas ó de lavas y tobas de composición química muy variable: riolítica, andesítica, dacítica ó basáltica, reciente o antigua, en paisajes, fisiografía y materiales de estados de desarrollo muy variables, dependiendo de factores como la altitud, topografía, clima, vegetación y tiempo (Shoji *et al.* 1993).

En la última versión de la Taxonomía de Suelos de los Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1999) los Andosoles se subdividen en siete subórdenes: Aquands, Cryands, Torrands, Xerands, Vitrand, Ustands y Udands.

De acuerdo a ISSS, ISRIC y FAO, 1994. World Reference Base for Soil Resources, (1998), los Andosoles pueden diferenciarse de acuerdo con su grado de desarrollo, se reconocen los vítricos (muy recientes), los alofánicos (de desarrollo incipiente) y los álicos (Andosoles maduros).

Andosoles vítricos, son los más recientes y poseen muchos minerales interperizables, aunque adolecen de un drenaje excesivo, lo que hace susceptibles a researse fácilmente.

Andosoles alofánicos. Tienen muchas ventajas sobre los otros dos tipos. En ellos no se presentan toxicidades por Al incluso a una saturación de bases en extremo. Se presenta una elevada capacidad de retención de P a causa de que este elemento se adsorbe fuertemente a materiales no cristalinos de Fe y Al, reduciendo así su biodisponibilidad (Shoji *et al.*, 1993).

Los andosoles álicos, tienen una fertilidad relativamente pobre como resultado de su alta capacidad de retención de P, su acidez, su toxicidad por Al (horizontes álicos), su baja velocidad de reciclado de materia orgánica y sus deficiencias de oxígeno, que pueden presentarse en horizontes superficiales muy hidratados (ISSS *et al.*, 1994). En ellos, la fracción arcillosa está dominada por minerales del tipo de la clorita 2:1, con fuerte acidez y gran cantidad ($>2\text{cmol kg}^{-1}$) de Al extractable con KCl, esto causa serios daños o toxicidades por Al a las raíces de las plantas. Además, se presenta un retardamiento en la descomposición de los materiales orgánicos por formación de complejos humus-Al.

Los Andosoles, especialmente los ándicos, son considerados en general como suelos muy fértiles, por su reciente origen, su gran cantidad de vidrio y minerales primarios altamente intemperizables y sus altos contenidos de N, P y S, inducidos en la materia orgánica (ISSS *et al.*, 1994). En regiones tropicales donde se practica la agricultura con bajos recursos y el intemperismo de los materiales edáficos es rápido, los suelos de cenizas volcánicas se conciben como los más productivos, en especial cuando el material parental es basáltico. Su alta productividad se asocia con la rápida liberación de nutrimentos, comparadas con la de otros suelos de las mismas regiones (Ramos, 1982, 1984; Rado *et al.*, 1985, 1982; Ping *et al.*, 1989; Shoji *et al.*, 1993; Besoain *et al.*, 2000; Borie *et al.*, 2003).

Se les reconocen otras características adecuadas para el desarrollo vegetal por poseer las siguientes características:

- Una zona profunda e irrestricta para la penetración de raíces.
- Gruesos horizontes de humus con cantidades altas de N.
- Abundante agua disponible para las plantas (Shoji *et al.*, 1993).

Comúnmente, el N, es el nutrimento limitante en el rendimiento de cultivos en la mayoría de los suelos, incluidos los Andosoles, aunque en condiciones naturales el suministro de N no presenta dificultades por las grandes cantidades de materia orgánica que posee.

Pero la principal limitante reportada es en general la baja disponibilidad de P, dado que se adsorbe fuertemente por materiales no cristalinos de Fe y Al, reduciendo su biodisponibilidad, aunque según Shoji *et al.*, (1993), la mitad del P se encuentra en formas orgánicas que se mineralizan con rapidez, manteniendo el suministro de este elemento a niveles apropiados.

Los vidrios volcánicos son componentes con altos contenidos de K en todas las tefras.

En Andosoles alofánicos que estén siendo cultivados, un manejo adecuado debe contemplar un suministro de P y K (Shoji *et al.*, 1993).

2.3.2 FIJACIÓN DE P. UN PROBLEMA EDAFO ECOLOGICO DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS

2.3.2.1 Composición mineralógica

Los datos disponibles sobre la composición mineral de los suelos derivados de cenizas volcánicas del Soconusco reflejan la abundancia de rocas y productos piroclásticos, cenizas y tefras de composición andesítica (Ramos, 1979,1982, 1984; Macías *et al.*, 2000). En términos generales, la fracción arena fina de los suelos del grupo Ando, (partículas de suelo de 0.2 a 0.02 mm de diámetro según la clasificación internacional) incluyen minerales ligeros y claros tales como cuarzo, plagioclasa, biotita, pumicita, fragmentos de vidrios volcánicos y ópalo, así como minerales pesados, tales como olivino, piroxeno, hornblenda, magnetita y algunos minerales opacos. Estos minerales se presentan en algunas asociaciones, cuyas propiedades están afectadas por la composición de las cenizas volcánicas originales y el grado de intemperización (Swindale, 1964,1969; Yamada, 1980; Ping *et al.*, 1988; Shoji *et al.*, 1993; Zehetner *et al.*, 2003).

La composición de los minerales en la fracción fina (partículas de suelos de menos de 0.002 mm de diámetro) consta de alófono principalmente, haloisita metahaloisita, gibsita, caolinita, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio y componentes amorfos que pueden ser estados intermedios en la intemperización de las cenizas volcánicas (Shoji *et al.*, 1993).

Hasta la actualidad se ha logrado conocer bastante acerca de la presencia del alofano y minerales relacionados en los suelos del grupo Ando. De acuerdo con Aomine (1958) y Kano (1961), la ubicación de los diferentes minerales en la secuencia de intemperización parece ser:

Vidrio Volcánico y feldespatos → alofano → haloisita y gibsita → metahaloisita.

Las investigaciones sobre la composición y propiedades químicas de los alófanos, complementadas con el uso de instrumentos modernos tales como difracción de rayos X, ATT y EAI, han mostrado que los alófanos son geles de aluminio-silicatos hidratados con mucho en común con los geles aluminio-silicatos preparados en el laboratorio.

La composición química promedio de éstos alófanos, pueden expresarse aproximadamente: $(\text{SiO}_2)_{1.5}.\text{Al}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})_{2.5}$

El grado de intemperización de los suelos volcánicos, en especial de los derivados de cenizas volcánicas varía de acuerdo con la edad de los depósitos y con las condiciones de intemperismo y afectan grandemente las propiedades del suelo.

El vidrio volcánico juega un papel importante en el origen del alófono y la imogolita. El hecho de que el contenido de vidrio volcánico disminuya con la intemperización indica que este material es inestable (Quantin, 1986; Shoji *et al.*, 1993).

Otra característica de estos suelos, lo constituyen las partículas ópalo-planta. Se pensó que estas partículas se originaban a partir de la actividad volcánica, pero posteriormente se ha probado que son ópalo-planta. La fuente del ópalo-planta se considera que son hojas, tallos y raíces de especies de ciertos géneros de gramíneas tales como *Miscanthus*, *Imperata*, *Zoysia* y *Sasa*. Las especies de estos géneros son también la fuente de la materia orgánica del suelo. La estabilización de la sílice como ópalo-planta puede tener una influencia importante sobre el ciclo del silicio en los suelos. Parfitt, 1985; Quantin, 1986; Parfitt *et al.*, 1989; Ping *et al.*, 1988).

Desde el punto de vista geológico y mineralógico, las investigaciones realizadas han dado luz sobre los procesos de formación del alófono y su alteración a haloisita por la intemperización de cenizas volcánicas.

Otro indicador significativo de la intemperización de las cenizas volcánicas, es la formación de gibsita. Los agregados de gibsita se forman bajo condiciones climáticas templadas y suficientemente húmedas, tales como aquellas que ocurren en climas tropicales y subtropicales, a condición de que la textura y la naturaleza mineralógica de los materiales volcánicos parentales sean adecuados (Parfitt, 1985; Parfitt *et al.*, 1989; Shoji *et al.*, 1993).

La composición mineralógica de la fracción arcillosa en los suelos del grupo Ando, muestra una zonalidad de acuerdo con las condiciones climáticas bajo las cuales ha ocurrido la intemperización y la formación de arcillas. En las zonas cálido-húmedas, se forma una considerable cantidad de alófono, debido a un severo intemperismo químico y se producen agregados estables, probablemente por efecto de la deshidratación durante la estación seca. En este caso, la gibsita puede originarse a partir del alófono y se encuentra a menudo en los estratos superficiales del suelo del tamaño de arcillas, como concreciones blancas. En las regiones más frías el alófono puede originarse a partir de vidrio volcánico, sin embargo, bajo estas circunstancias, el alófono tiene alta dispersabilidad y es muy fácilmente lixiviado y transformado en gibsita por desilicatación (Parfitt, 1985; Parfitt *et al.*, 1989; Nazyo *et al.*, 1993; Shoji *et al.*, 1993).

En el curso de las investigaciones sobre el alófono del suelo, se descubrió un nuevo mineral en algunos suelos del grupo Ando, denominado "imogolita". La palabra "imogo" significa suelo derivado de cenizas volcánicas vidriosas y la palabra imogolita fue aprobada como nombre del nuevo mineral por el Comité sobre Nomenclatura de la Asociación Internacional sobre estudios de las Arcillas en la Conferencia Internacional sobre arcillas, de Tokio, Japón, en septiembre de 1969.

El alófono se dispersa tanto en un medio ácido como alcalino, mientras que la imogolita se dispersa sólo en un medio ácido. Este mineral está caracterizado por varias bandas estrechas pero intensas de difracción de rayos X, un pico endotérmico entre 410 y 430°C en el A.T.D. y un tamaño de 100 a 200 Angstroms de diámetro en el microscopio electrónico. Los resultados indican que la imogolita está estructurada en forma distinta que

el alófono y otros minerales estructurados en láminas y cadenas conocidas. La imogolita parece ser un constituyente común de las pumicitas intemperizadas y suelos derivados de cenizas volcánicas (ICOMAND, 1986; Kawai, 1980; Martini, 1969; Shoji *et al.*, 1993).

Se ha encontrado que los materiales amorfos de suelos jóvenes derivados de cenizas volcánicas son altamente ricos en sílice. La relación molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ promedio es de 10.3 en los suelos más jóvenes de 600 años y de 5.0 en los suelos con antigüedad entre 600 y 1200 años (Forsythe *et al.*, 1969; Kanehiro *et al.*, 1972; Shoji *et al.*, 1993).

El desarrollo de los Andisoles comprende un conjunto de procesos definidos como andosolización, caracterizados por Ugolini y otros investigadores, citados por Shoji *et al.* (1993), como la acumulación de Fe, Al y carbono orgánico disuelto, en el horizonte A, con poco lavado de estos componentes hacia el horizonte B, cuya formación está dominada por procesos de meteorización *in situ*.

Inicialmente se consideró que la fijación de P en los Andisoles ocurría solamente en las superficies activas del alófono y la imogolita. Los mecanismos de fijación de P en alófono e imogolita incluyen procesos como quimiodsorción, desplazamiento de silicio (Si) estructural y precipitación. Sin embargo, se ha reconocido la importancia de los complejos humus-Al en este proceso. De acuerdo a Martini, (1969); Kawai, (1980); ICOMAND, (1986); Shoji *et al.*, (1993), la fracción humus en Andisoles forma fácilmente complejos con metales como el Al. El carbono (C) atrapado en estos complejos es inactivo y deja de ser parte del C activo de la fracción orgánica. Por otro lado, los grupos hidroxilo combinados con el Al acomplejado entran en reacciones de intercambio de ligandos con $\text{HPO}_4^{=}$ y H_2PO_4^- .

En resumen, los Andisoles constituyen una clase de suelos que tiene una serie de características y propiedades muy particulares, originadas en la fracción coloidal que poseen.

2.3.2.2 Propiedades del alófono

Las propiedades químicas especiales de los suelos del grupo Ando tienen su origen en las peculiares características del coloide alófono (Swindale, 1964, 1969; Yamada, 1980; Ping *et al.*, 1988; Shoji *et al.*, 1993; Campos *et al.*, 2001; Zehetner *et al.*, 2003).

Se ha caracterizado la naturaleza del alófono como ácida, en base a los valores del pH final, acidez intercambiable y curvas de titulación. Experimentos con curvas de titulación muestran que el alófono en agua tiene escasa capacidad neutralizante cuando se añaden pequeñas cantidades de agua y ácidos o bases. Este comportamiento es consecuencia de la débil disociación de los iones hidrógeno e hidroxilos del alófono cuando se encuentra a pH cercanos al pH final, por lo que se infiere que las cargas negativas o capacidad de intercambio de cationes tienen su origen básicamente en los grupos SiOH. La

capacidad de intercambio de cationes, con el método de Schollenberg varía desde alrededor de 20 a 100 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ (Birrel, 1964; ; Besoain *et al.*, 2000; Alvarado *et al.*, 2001; Campos *et al.*, 2001).

2. 3.2.3 Reacciones con aniones

La reacción de las arcillas con aniones puede incluir no sólo un verdadero intercambio aniónico sino también la formación aditiva de nuevos compuestos sólidos.

La reacción del alófano con los iones fosfatos es la más importante de las reacciones aniónicas desde el punto de vista agrícola. Wada (1969) encontró que el fosfato de amonio reacciona rápidamente con el alofano a pH 4 para producir una taranakita sustituida con amonio (fosfato de amonio-aluminio hidratado). Los cristales de este nuevo fosfato formado pueden observarse en un microscopio común después de sólo unos pocos días de contacto de este mineral con soluciones fosfatadas a temperatura ambiente. El alófano puede convertirse por completo en un fosfato del tipo de la taranakita en el curso de unas tres semanas. Cabe señalar que la reacción anterior puede ser retardada a un pH 7.0, lo cual ayuda a explicar la importancia del pH en la fijación de P.

El alófano reacciona también con el "ácido húmico". Esta reacción es probablemente la causa principal de la abundancia de acumulación de la materia orgánica en los suelos que contienen alófano. La propiedad denominada alítica de las arcillas alofánicas es disminuida por la reacción de ellas con la materia orgánica, debido a que la materia orgánica reacciona con el Al que es el origen de ésta propiedad. El ácido húmico neutraliza las cargas positivas de las arcillas alofánicas (Egawa, 1977; Darlgren *et al.*, 1991; Besoain *et al.*, 2000; Campos *et al.*, 2001).

El número de coordinación del Al del alofano ha sido materia de interés debido a su posible conexión con las propiedades y el proceso de formación del alófano, lo cual según las investigaciones existen diferentes proporciones de Al de coordinación cuatro y seis (Birrel, 1964; Wada *et al.*, 1979; Besoain *et al.*, 2000).

2.3.2.4 Propiedades físicas

Estos suelos tienen un contenido muy alto de humedad natural y unido a esto, una densidad aparente baja; tienen alta porosidad, por lo cual son lixiviados fácilmente y susceptibles a la erosión. Su área de superficie específica alta les confieren propiedades de absorción muy altas para la materia orgánica, iones y partículas. Estos suelos parecen grasosos al tacto y la variación del tamaño de sus partículas es grande (Swindale, 1964, 1969; Swindale, 1969; Yamada, 1980; Ping *et al.*, 1988; Shoji *et al.*, 1993; Zehetner *et al.*, 2003).

2.3.2.5 Propiedades químicas

Los suelos derivados de cenizas volcánicas tienen un alto contenido de materia orgánica en los primeros 30 cm de suelo y varía del 5 al 20%. Tienen un pH que fluctúa entre 4 y 6.5, es decir, éstos suelos tienen condiciones que van de fuerte a débil acidez y su CIC varía de 15 a 20 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$. Su relación carbono-nitrógeno (C/N) es alta y su contenido de N va de 0.2 a 0.8%. La fracción arcilla separada de los suelos muestra una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ que varía de 1 a 4.5 (Martini, 1969; Egawa, 1977; ICOMAND, 1986; Nazyo *et al.*, 1993).

La saturación de bases varía mucho y de sus bases cambiables domina el Ca y le sigue el Mg. Otra de las características de estos suelos son su alto contenido de Al^{3+} intercambiable que junto con el alófono son los responsables en gran parte del alto poder para fijar fosfatos, molibdatos y otros aniones de estructura similar (Ramos, 1982, 1984; Ping *et al.*, 1988; Shoji *et al.*, 1993; Swindale, 1969; Zehetner *et al.*, 2003).

El material humificado de estos suelos tiene resistencia a la descomposición microbiana (Shoji *et al.*, 1993).

2.3.2.6 Fijación de P

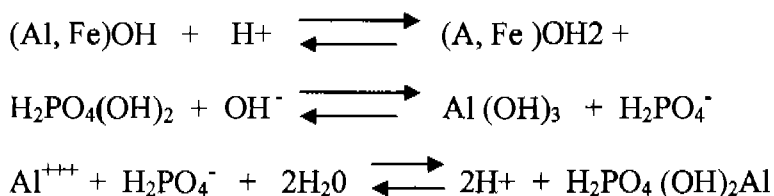
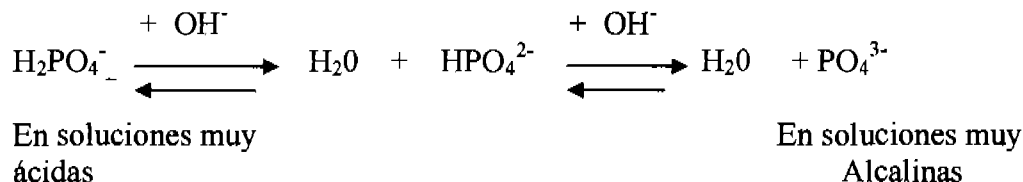
Dentro de los problemas de fertilidad considerados centrales en estos suelos, es muy conocido el fenómeno por el cual solamente una pequeña parte del P aplicado como fertilizante es aprovechado por las plantas. El papel del P en las plantas y animales es muy complejo. Puede existir en el suelo en muchas formas químicas, algunas están disponibles para las plantas en tanto que otras no. Analizar este elemento nutritivo y determinar la cantidad que debe aplicarse a un cultivo es más difícil para el P que para cualquier otro elemento. Ramos, (1982), realizó diversos experimentos de invernadero, donde se investigó la capacidad de fijación de P en tres suelos volcánicos de la región cafetalera del Soconusco, evaluándose en plantas indicadoras de deficiencias de éste elemento, encontrándose niveles de fijación de P altos, que fluctuaron entre el 70 al 90%, evidenciándose esto como una problemática de fertilidad de esos suelos.

La fijación de P, consiste en el paso de los fosfatos aplicados al suelo como fertilizantes a formas menos solubles a través de su reacción con el suelo. Entre las investigaciones conducidas en suelos volcánicos de otros países para conocer esta problemática, se citan los trabajos de Fassbender *et al.*, (1967, 1968, 1969, 1978, 1987; Bravo y Gómez, (1974) para suelos volcánicos cafetaleros de Colombia y Costa Rica y Ramos, 1982, 1984, los cuales encontraron una alta capacidad de fijación de P en diversos suelos, hasta en un 90% del P agregado.

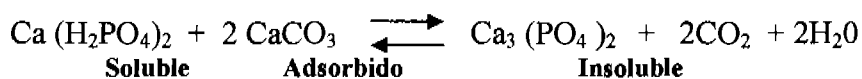
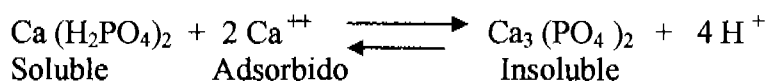
Al aplicarse un fertilizante fosfatado, se disuelve pasando a la solución del suelo; los iones H_2PO_4^- resultante pueden ser absorbidos por las plantas, pero al mismo tiempo son objeto de numerosas reacciones e interacciones con las fases sólidas y líquidas del suelo.

Así, debido a la presencia de cargas electropositivas del complejo coloidal del suelo, los iones H_2PO_4^- pueden ser absorbidos en la superficie de los mismos. Por otro lado, debido a la presencia de iones Al^{3+} , Fe^{3+} y Ca^{2+} , en la solución del suelo, se produce la precipitación de fosfatos simples ó complejos de baja solubilidad, como se muestran a continuación (Fassbender, 1966, 1968, 1969, 1975, Fassbender *et al.*, 1967, 1968, 1969, 1978, 1987; Ramos, 1982, 1984 ; Canessa *et al.*, 1987; Beck *et al.*, 1998; Fernández *et al.*, 2001; Bunemann *et al.*, 2004).

Las reacciones químicas que intervienen en la fijación son las siguientes:



En los suelos ácidos, predominan las reacciones de los fosfatos con Al^{3+} y Fe^{3+} , en los alcalinos la precipitación por Ca^{2+} y en los calcáreos la adsorción es en particular con CaCO_3 . Estos factores gobiernan las reacciones de los fertilizantes fosfatados en los suelos.



Dentro de las prácticas agronómicas para controlar la fijación de fosfatos y mejorar el aprovechamiento de los fertilizantes fosfatados, están los siguientes:

1. Encalado.

Una de las propiedades químicas más importantes del alófono de los suelos derivados de cenizas volcánicas, es la marcada tendencia del Al de los amorfos alofánicos, a activarse a bajos pH (Quirós *et al.*, 1979; Serpa *et al.*, 1979; Villar *et al.*, 1979; Sánchez *et al.*, 1983).

La aplicación del encalado es uno de los tratamientos químicos básicos usados para inactivar el Al, debido a que resulta más económico que la aplicación de fertilizantes fosfatados. El efecto benéfico de las aplicaciones de carbonatos como material de enmienda ha sido atribuido entre otras causas a los cambios físicos del P, a la disminución en la toxicidad del Al y aumentos en la reacción del suelo. Un aumento del pH en el suelo tiene un efecto múltiple, acelerando la mineralización de la materia orgánica, aumentando la nitrificación, la actividad bacteriana y disminuyendo la actividad y posible toxicidad del Al, disminución de hierro y Mn, precipitándolos como hidróxidos (Hsu, 1965; Fassbender, 1966, 1968, 1969, 1975; Fassbender *et al.*, 1967, 1968, 1969, 1978, 1987; Holford *et al.*, 1979; Ramos, 1982, 1984; Canessa *et al.*, 1987; Beck *et al.*, 1998; Bunemann *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 2001).

2. Mejoradores aniónicos orgánicos e inorgánicos

De acuerdo a los resultados de Ramos (1982), el problema de la disponibilidad de la nutrición fosfatada, se ha tratado también de resolver mediante aplicaciones muy elevadas de enmiendas silicofosfatadas. En experimentos de invernadero llevados a cabo por la autora en 1982, usando suelos volcánicos y plantas indicadoras (*Lactuca sativa*) demostró la importancia del uso de las enmiendas silicatadas en dicho experimento. Esto es de particular interés, pues las enmiendas silicatadas producen efectos muy importantes sobre la reacción del suelo y fijación de fosfatos.

Las enmiendas silicatadas mejoran la disponibilidad de fosfatos a través de la influencia sobre la distribución de fosfatos inorgánicos, provocando una hidrólisis de fosfatos de hierro y aluminio y la formación de fosfatos cálcicos, la activación de la mineralización de fosfatos orgánicos, la disminución de la fijación de P y el aumento de la actividad iónica del H_2PO_4^- presente en la solución del suelo (Fassbender, 1967, 1969; Barrow, 1979; Earl *et al.*, 1979; Kawai, 1980; Beck *et al.*, 1998; Giesler *et al.*, 2005).

El efecto benéfico de los silicatos en cuanto a P ha sido atribuido a la competencia que se establece entre el ión SiO_3^{3-} y el ión HPO_4^{2-} en las posiciones de absorción de cambio (Fassbender y Muller, 1967, 1969; Fassbender y Molina, 1969; Roy *et al.*, 1971; López-Hernández *et al.*, 1979).

Al igual que el encalado, el uso de silicatos de Ca^{2+} ó Na^+ conduce a cambios en la reacción del suelo. Según los autores anteriores, los materiales utilizados en enmiendas silíceas se dividen en cuatro grandes grupos:

- 1) sílice coloidal,
- 2) sales del ácido silícico ya sea en su forma de orto o meta silicatos de Na, Ca, Mg y K. Generalmente se trata de productos técnicos de la industria química, solubles en agua,
- 3) silicatos de calcio de las escorias obtenidas como subproductos en altos hornos conteniendo menos del 10% de P_2O_5 y
- 4) fertilizantes silicofosfatados con un contenido de P_2O_5 del 30%

2.3.3. EL CAFETO: ORIGEN, TAXONOMIA Y MORFOLOGIA

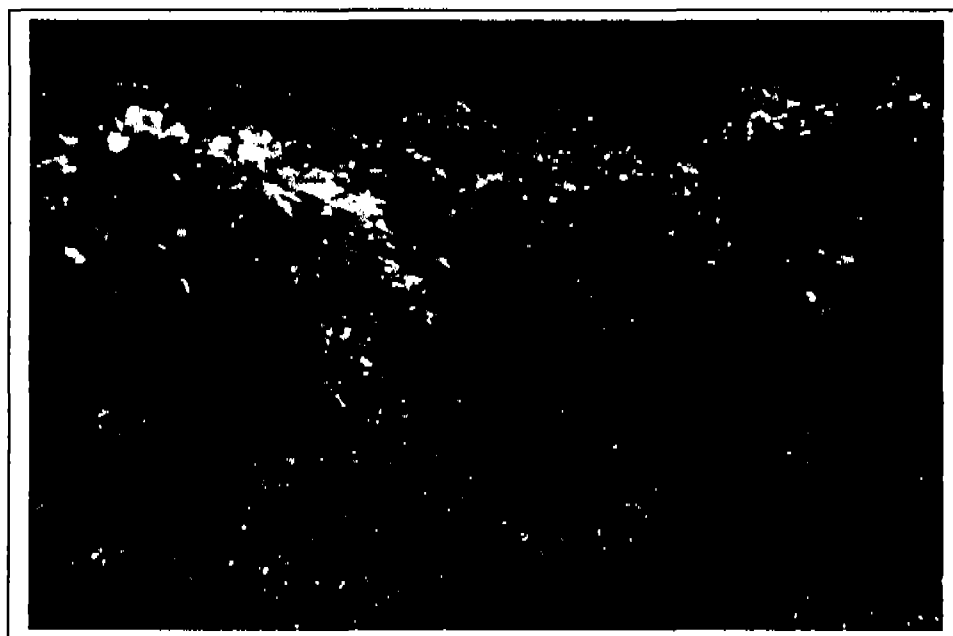


Figura 11. Cafetal con sombra

2.3.3.1 El cafeto: origen, taxonomía y morfología

El café es el nombre común de las semillas provenientes de los arbustos del género *Coffea* de la familia Rubiáceas, así también se llama a la bebida que con ellas se prepara. De la treintena de especies que comprende el género *Coffea* sólo son importantes tres: *C. arabica*, *C. canephora* y *C. libérica*. El género *Coffea*, mantiene sus hojas lustrosas, verdes, durante tres a cinco años y sus flores son blancas, fragantes, que sólo permanecen abiertas durante unos pocos días (figs. 11 y 12). El fruto, llamado "cereza" por su parecido con esta fruta, se desarrolla en el curso de los seis o siete meses siguientes a la aparición de la flor; cambia desde el verde claro al rojo o amarillo según la variedad y, cuando está totalmente maduro y listo para la recolección, al carmesí. El fruto maduro se forma en racimos unidos a las ramas por tallos muy cortos; suele encerrar dos semillas rodeadas de una pulpa dulce. (fig. 13) (Carvajal, 1972, 1984; Coste, 1978; Haarer, 1977; Inmecafé 1990).



Figura 12. Frutos verdes del cafeto

De acuerdo a los autores antes citados, las plantas de café producen la primera cosecha de rendimiento pleno cuando tienen en torno a cinco años de edad. A continuación mantienen una producción constante durante 15 a 20 años. El principal método de recolección se basa en recoger los frutos maduros en dos o tres colectas selectivas. Las semillas obtenidas mediante la primera técnica suelen beneficiarse, si hay agua, por el llamado método húmedo: ablandamiento en agua, eliminación mecánica de la pulpa, fermentación en grandes depósitos, nuevo lavado y secado al aire o en cilindros giratorios calientes. El producto final es siempre el llamado café verde, que se selecciona a mano o a máquina para eliminar las semillas defectuosas y la materia extraña, y se clasifica en función del tamaño.



Figura 13. Frutos maduros del cafeto

De 1.000 kg de café cereza maduro se generan 400 kg de pulpa y 600 kg de café despulpado (café oro) y 222 kg de café pergamino seco, por lo que se dice que la pulpa contiene la mitad de los elementos nutritivos del fruto (Carvajal, 1972, 1984; Licona, 1979).

En México se cuenta con granos de la más alta calidad. El café de altura, cultivado por arriba de los 900 metros sobre el nivel del mar, es de los más cotizados. Muchos factores determinan la calidad de un buen café, como son las características del grano, la altura, humedad, suelo, vegetación, sombra; un estricto control en las labores culturales y la cosecha; el control en el proceso de industrialización (el beneficio que se utiliza generalmente es por vía húmeda), el tueste y molido adecuados y por último la preparación en taza (Inmecafé, 1990)

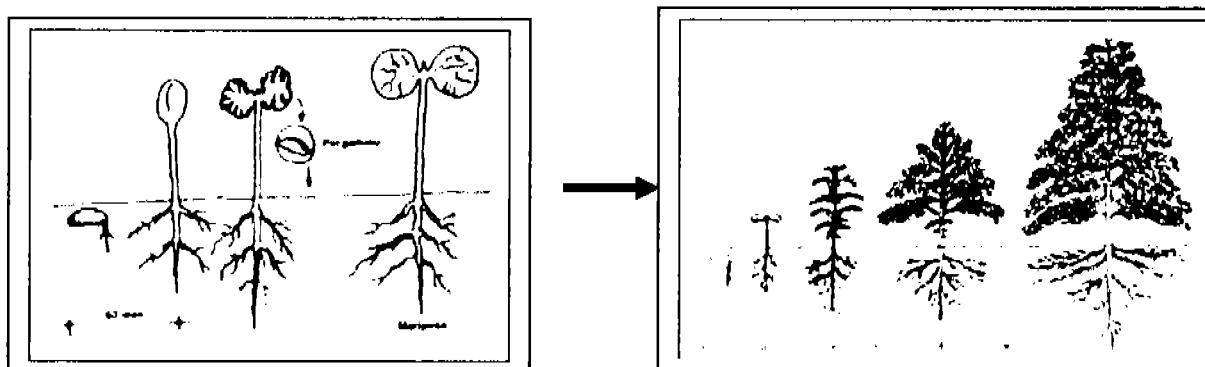
Las especies del arbusto del cafeto que se cultivan en el país son dos: 1) la arábica, árabe o arábica y 2) la robusta o canephora. En México se produce, hasta ahora, un 96% de café arábica y un 4% de café robusta. El café arábica, tiene mayor valor en los mercados nacional e internacional. Produce una bebida suave, con gran aroma y acidez y un cuerpo mediano, agradable, bouquet y exquisito sabor. Cada una de sus variedades confiere a la taza características diferentes. Algunas de las variedades de esta especie son: typica, bourbon, mundo novo (Inmecafé, 1990).

Aproximadamente el 98% de los cafetos son variedades arábicas como la Bourbon, Caturra, Maragogype (o Mátago), Mundo Novo, Garnica y Typica; siendo esta última la que predominaba en México hasta hace poco; sin embargo, actualmente se le está reemplazando por variedades de porte bajo y mayor producción como la Catimor y Catuai. Cada variedad posee diferencias de calidad, volumen producido, rendimiento, resistencia a las plagas y a las enfermedades, aroma, acidez, etc (Haarer, 1977; Coste, 1978; Inmecafé 1990). El café robusta se considera de menor calidad, produce una bebida con poco aroma y sabor, y mucho cuerpo. Un café arábigo tostado contiene menos cafeína que un robusta (Haarer, 1977; Coste, 1978; Inmecafé 1990).

El *Coffea arábica* es un arbusto no muy alto, que alcanza una altura de 8 a 10 metros, cuando crece libremente, y de 2 a 2,50 metros, cuando es podado en plantación para facilitar su mantenimiento y la recolección de los frutos (Haarer, 1977; Coste, 1978).

El café es un cultivo permanente, se siembra y empieza a producir después de cuatro años. Su vida productiva puede ser mayor a los 40 años, su producción se da una vez al año durante lo que se llama ciclo cafetalero (Inmecafé, 1990; Sáenz, 1990).

Dependiendo de la zona y la altura es la época de corte. En México inicia en septiembre y concluye en marzo. El recorrido que sigue la semilla del cafeto hasta llegar a la taza inicia en el semillero donde se pone a germinar la semilla y dos meses después se obtiene una plántula llamada soldadito y cuando hay dos hojitas alcanza la fase de mariposa y se transplanta al vivero, también se transplanta en "pesetilla" (2 pares de hojitas) o en "naranjito" (tres pares) (Carvajal, 1974, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Inmecafé, 1990) (figs. 14 y 15).



Figuras 14 y 15. Recorrido de la semilla hasta su establecimiento en la plantación

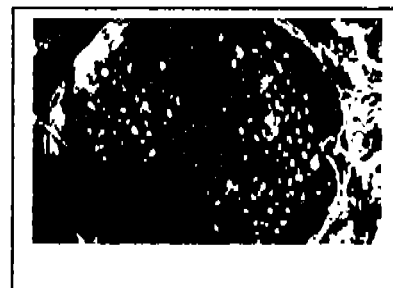
De acuerdo a los autores, coinciden en que la floración depende de muchos factores como los cuidados que se den a la planta, la regulación de sombra, la edad de la planta. Puede haber de tres a cuatro floraciones y de su número depende el número de cortes.

El corte se hace a mano en forma selectiva y sólo se cortan los frutos maduros que son de color cereza. Los primeros frutos se dan cuando la planta tiene de tres a cuatro años de vida (fig. 16).



Figura 16. Procesos de producción del cafeto: plantación, floración, frutos verdes y frutos maduros.

El fruto que nace del ovario de la flor fertilizada es una drupa conocida como cereza, de forma elipsoidal, ligeramente aplanado, con un diámetro de unos 1.5 cm. El fruto del café cuando está inmaduro es de color verde al principio (fig. 12), conforme madura cambia de color hasta llegar al rojo cereza o amarillo, según la variedad y es el momento para el corte del fruto (figs. 17 y 18). En su exterior presenta una piel brillante y espesa, el exocarpio, que recubre una capa de cerca de 2 mm de una pulpa tierna y azucarada, que es el mesocarpio o mucílago (Carvajal, 1972, 1984).



Figuras 17 y 18.

La cosecha del café es manual, y se utilizan canastos atados a la cintura.

El fruto del cafeto cuyas semillas tostadas y molidas constituyen más tarde el producto final para la aromática bebida ampliamente utilizada para el consumo humano, está compuesto por:

2.3.3.2. Pulpa

La cubierta exterior del fruto maduro, llamada **pulpa** lo constituye el **epicarpio** y **mesocarpio** del fruto, de pigmentación roja o amarilla, del fruto maduro del café, rico en azúcares, hidratos de carbono, taninos, almidón y sustancias colorantes, la cual es removida del grano en el proceso conocido como el despulpado (Calle, 1977; Coste, 1980; Jácome, 1980) (figs. 19, 20 y 21).



Figuras 19 y 20. Aspectos del fruto de café maduros y el despulpado de la cereza de café.

Estos autores señalan que, previamente a la remoción de la pulpa ó despulpado, el café es depositado por no más de 12 horas, en un tanque de recepción “recibo” lleno de agua, donde se separan, por diferencia de peso, los frutos buenos (de mayor peso) de los frutos vanos y otros materiales. Estos subproductos se tiran en los ríos o se acumula en fosas o en la superficie, la cual puede utilizarse como abono. La pulpa representa alrededor del 43 al 60% del fruto (Jácome, 1980).

En varios países, se han efectuado análisis químicos de la pulpa del café con resultados muy diversos en cuanto a los constituyentes y sus cantidades. En términos generales la pulpa fresca contiene mucha agua y cantidades variables de nutrimentos como N, P, K, Mg, Ca, S, Fe, Mn, B y otros (Carvajal, 1972 1984; Calle, 1977; Coste, 1978).

De acuerdo a Jácome, (1980), la proteína de la pulpa de café contiene niveles similares o más altos de aminoácidos que otros productos, tales como la harina de algodón y la harina de soya. Según éste autor, alrededor del 40% del N total de la pulpa de café, es N no

proteico que incluye cafeína, trigonelina, niacina, purinas, pirimidinas, nitrógeno inorgánico entre otras (cuadro 2, figura 21).

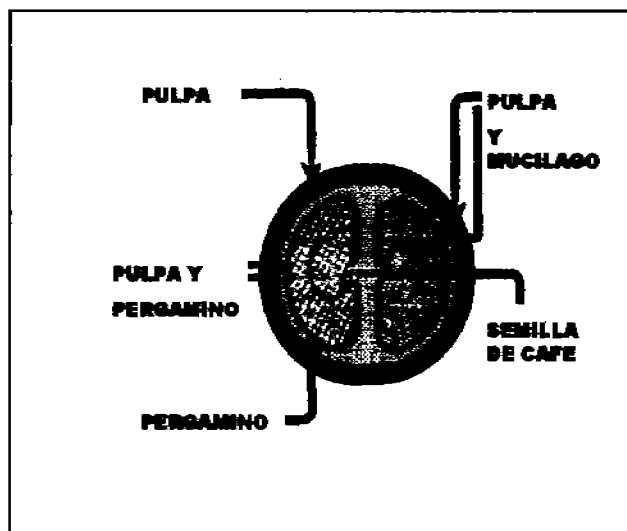


Figura 21. Descripción del fruto. Corte longitudinal de una cereza de café (*C. arabica*)

Finalmente, la pulpa por fermentación aeróbica ó anaeróbica y en condiciones apropiadas, se descompone y se transforma en humus (Haarer, 1977; Coste, 1978; Jácome, 1980; Inmecafé, 1990; Valencia, 1999).

Cuadro 2. Composición química de la pulpa de café

Componente	%
Humedad	74%
Materia seca	23.30%
Ceniza	2.68%
Fibra cruda	3.402
N total	1.70%
Extracto etéreo	0.48%
P total	0.20%
Proteína cruda (Nx6.25)	2.10%
K	1.06%
Mg	0.07%
S	0.11%
Ca	0.45%
Fe	90 ppm
Mn	8 ppm
B	17 ppm

Fuente: Jácome, (1980)

2.3.3.3. Mucílago

El **mucílago** es una sustancia gelatinosa azucarada que recibe, contiene sustancias pépticas, proteínas, la cual es eliminada durante la fermentación. Se efectúa en tanques donde el grano permanece de 14 a 20 horas. El mucílago representa el 23% del fruto (Carvajal, 1972, 1984; Jácome, 1980; Valencia, 1999) (cuadro 3).

Cuadro 3. Composición química del mucílago

Componente	% azúcares invertidos
pH	5.30%
Humedad	77.80%
Pectinas totales B.H.	16.43%
Pectinas totales B.S.	3.65%
Azúcares totales	56.20%
Peso específico aparente	1.04 g/ml
N	6.70%
Azúcares invertidos	30.50%
Azúcares no invertidos	36.20%
Pectinas	10.70%

Fuente: Jácome, (1980)

2.3.3.4 Pergamino

La cubierta dura se denomina **pergamino** o cáscara (que constituye el endocarpio), está formado por material celulósico que envuelve a los granos, es muy resistente cuando está seco y de color amarillo pajizo. En la etapa del trillado-pulido se efectúa el descascarar. Este consiste en quitar el pergamino para pasar a la pulida del grano que finalmente eliminará la película plateada de la semilla. Estos residuos se emplean como combustibles, y tienen un alto poder calorífico: 4,200 cal/kg. El pergamino representa alrededor del 12.6% del fruto y contiene poco valor nutritivo (Cuadro 4). (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Jácome, 1980; Valencia, 1999).

Cuadro 4. Composición química del pergamino de café

Componente	%
Humedad	9.20
Materia seca	92.80
Extracto etéreo	0.60
N	0.39
Cenizas	0.50
Extracto libre de nitrógeno	18.90
Ca	1.5 meq
P	0.028

Fuente: Jácome, (1980)

Estos autores señalan una última cubierta más delgada y fina llamada película que envuelve al grano. Esta cutícula es sumamente delgada y de color plateado es desprendida en el proceso del pulido del grano. Representa alrededor del 0.95%.

2.3.3.5. Café oro

El grano, conocido como **café oro**, sin tostar del cual se ha eliminado la pulpa y pergamino, es también conocido como almendra, café verde o semilla. La semilla está constituida en su mayor parte por endospermo, cuyas células contienen almidón, aceites, azúcares, alcaloides (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Jácome, 1980; Valencia, 1999). En el cuadro 5 se muestra los contenidos en café oro y frutos maduros, donde se observa las concentraciones de N y P.

Cuadro 5. Comparación de los componentes del café en frutos maduros, café oro y cenizas de la semilla de café

Componente	Frutos maduros	Café oro	Cenizas de semilla de café
Humedad%	47.09	7.97	-
Materia orgánica	50-37	84.67	-
N	0.876	2.285	-
K	1.11	2.025	62.47
Ca	0.18	0.16	6.29
P	0.17	0.37	13.29
Sí	0.08	-	0.54
Na	0.05	0.095	1.64
Mg	0.12	0.36	9.67
Fe	0.06	0.055	0.65

Fuente: Haarer, (1979)

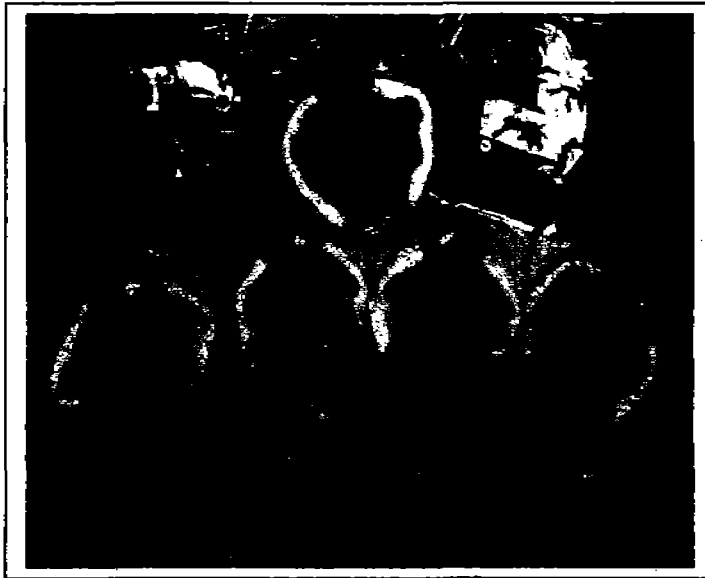


Figura 22.
Aspectos del proceso
del café:
café maduro,
café pergamino,
café verde y
café tostado

El café pergamino, totalmente despulpado, seco y limpio que ha pasado por un proceso de beneficio húmedo es finalmente empacado en sacos de yute para comercializarse. En la figura 22 se muestran los diferentes aspectos del proceso del café. El café oro representa alrededor del 18% del fruto o cereza (Inmecafé, 1990).

En el cuadro 6 se muestra una comparación de los contenidos de los principales macronutrientes en pulpa y café oro, notándose la importancia del N, P y K, los cuales son indispensables para la obtención de calidad y cantidad del café.

Cuadro 6. Composición química de subproductos del café

Determinación	Pulpa%	Café oro (almendra ó semilla)%
N	1.25-1.68	1.3
P	0.10	0.15
K	3.03	1.2-1.7
Ca	0.25	0.12-0.18
Mg	0.05	0.3-0.5

Fuente: Calle, (1977)

En el cuadro 7 se muestra, de acuerdo con Calle, (1977), la distribución en % del peso de los subproductos de café. Durante el beneficio húmedo del café, éste es sometido a una serie de procesos en donde se producen materiales de desecho que representan el 90.5% del peso del grano, o sea que sólo se utiliza el 9.5% de su peso en la preparación de la bebida final de café.

Cuadro 7. Proporción relativa en % de los subproductos de la cereza de café

Partes del fruto	Subproducto	%
Epicarpio	Pulpa	43%
Mesocarpio		23%
Endocarpio	Pergamino	12.6%
Endosperma	Película plateada	0.95%
Endospermo	Grano de café o café oro	18%

Fuente: Jácome, (1980).

En el siguiente cuadro 8, se muestran las pérdidas de los subproductos finales en el beneficio del café que va desde la cosecha de un kg de café cereza hasta la obtención de la bebida de café.

Cuadro 8. Subproductos obtenidos en el proceso de beneficio de un kg de café en cereza

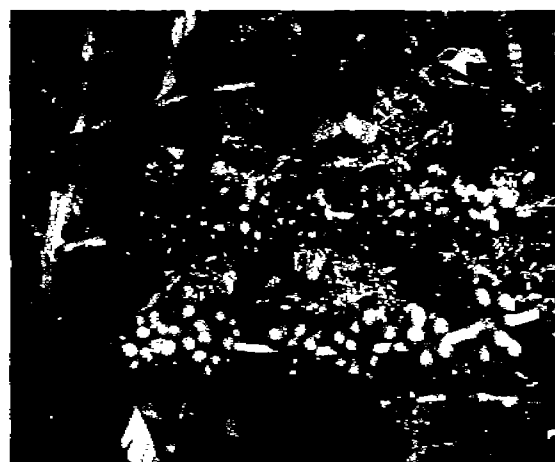
Proceso	Pérdida (g)	Subproductos
Despulpado	394	Pulpa fresca
Fermentación	216	Mucilago
Trilla	35	Pergamino (cascarilla)
Secado	171	Agua
Torrefacción	22	Cafeína y sustancias volátiles
Preparación de la bebida	104	Borra
Total	92	

Fuente: Calle, (1977).

Y, finalmente en la torrefacción o tostado del grano o almendra, se produce un procedimiento de pirólisis que llevando los granos de la temperatura ambiente a una temperatura de 200 a 300°C durante un lapso de unos 10 a 15 minutos, provoca importantes cambios físico-químicos que hacen la preparación más fácil y mejoran la calidad de la bebida. Cuando viene el proceso de la molienda, la pared celular del grano se rompe, el gas y los aromas volátiles son liberados, los aromas se intensifican durante un cierto tiempo para luego disminuir. Con la temperatura varían los aromas, y también el gusto del café, el amargor aumenta, mientras que la acidez disminuye. Los cafés tostados más claros tienen un gusto acidulado, mientras que los más oscuros serán más amargos (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Jácome, 1980, Valencia, 1999).

2.3.4 RELACIÓN ECOLÓGICA SUELO-PLANTA-PRODUCTIVIDAD DEL CAFE

La mayor parte de los nutrientes que la planta requiere para satisfacer las exigencias de crecimiento y de la ontogenia, procede del contenido presente en la parte superior del suelo (Carvajal, 1984). Si ésta llega a perder fertilidad y humedad, a pesar de que algo obtiene la planta de los estratos inferiores, el arbusto sufre de una deficiencia de minerales, ya que no se induce una corriente transpiratoria que atraiga los nutrientes a la superficie de las raíces y en consecuencia su velocidad de difusión es muy baja en un suelo seco. Esta situación es menos detrimental para los nutrientes más móviles como el caso del N, pero es más complicado para otros elementos entre los que se citan al P (figs. 23 y 24).



Figuras 23 y 24. Una buena distribución de raíces es función de un suelo con buenas propiedades físicas químicas y biológicas y asegurarán una buena nutrición y fructificación

Por lo que se refiere a la raíz del cafeto, de acuerdo a Coste, (1978), se ha comprobado que más del 80% de las raíces se encuentran en la capa superior del suelo, comprendida entre la superficie y 0.30 m. Nutran, citado por Coste, (1978), ha llegado a medir un total de 22,765 raíces y raicillas en un cafeto adulto (fig. 23).

Numerosos factores influyen en el desarrollo de la red subterránea del cafeto. Independientemente de las características hereditarias del mismo (variedad, especie), pueden citarse que la estructura del suelo, su carácter, textura, aireación, porosidad, drenaje, humedad, pendiente, así como por sus propiedades químicas y riqueza mineral, etc., influyen en su distribución. Sin embargo el cafeto ha tenido una notable adaptación al medio, tanto en suelos pesados, como arenosos, resultando como es de esperarse notables diferencias en producción y calidad, por lo que la mayoría de las veces se requiere fertilización o abonamiento para tener cosechas adecuadas (Carvajal, 1984).



Figura 25. La formación del área foliar del cafeto influye en una respuesta adecuada para la producción y fructificación

De acuerdo a Carvajal, (1984), las investigaciones realizadas han demostrado que el área foliar es probablemente la manifestación del crecimiento que se relaciona más de cerca con la producción de la planta (fig. 25). Si este criterio se aplica, la mayor cosecha efectiva probablemente resulta influida en buena parte por la mayor área foliar que exhiban las diferentes variedades como Bourbon y Caturra que producen más área foliar que la Typica, lo que se traduce en una capacidad fotosintética absoluta más elevada en las primeras. El efecto beneficioso de los fertilizantes sobre la producción se debe precisamente a la mayor área foliar que forman los vegetales a sus expensas.

Dado que el cafeto se cultiva en una variedad de condiciones ecológicas en altitudes desde unos pocos metros sobre el nivel del mar hasta aproximadamente 2000 m en los diversos tipos de suelos y climas, el balance hídrico en cafetales es de mucha relevancia, y las plantaciones con y sin sombra han sido objeto de estudios (Carvajal, 1984) y se ha puesto en evidencia que las plantas bajo sombra disminuyen la pérdida de agua por evapotranspiración en tanto que los valores máximos se registran en el cultivo de solana. La distribución de lluvias tiene que ver con la deficiencia estacional de algunos nutrimentos, por ejemplo de B y P durante la estación seca, y hasta cierto punto, de N y K (por el lavado de este último a partir de las hojas) durante las lluvias fuertes y prolongadas. Asimismo, existe evidencia que cuando ocurre escasez de agua la deficiencia de N usualmente acompaña a la de P (Carvajal, 1984).

La disponibilidad de agua está en íntima relación con ciertos procesos fisiológicos primarios, como la fotosíntesis y la transpiración. Un inadecuado suministro de agua

también incide en procesos como respiración, apertura de estomas, floración y tamaño de los frutos. Se sabe que un déficit hídrico afecta más severamente al mecanismo de la fotosíntesis que al de la transpiración.

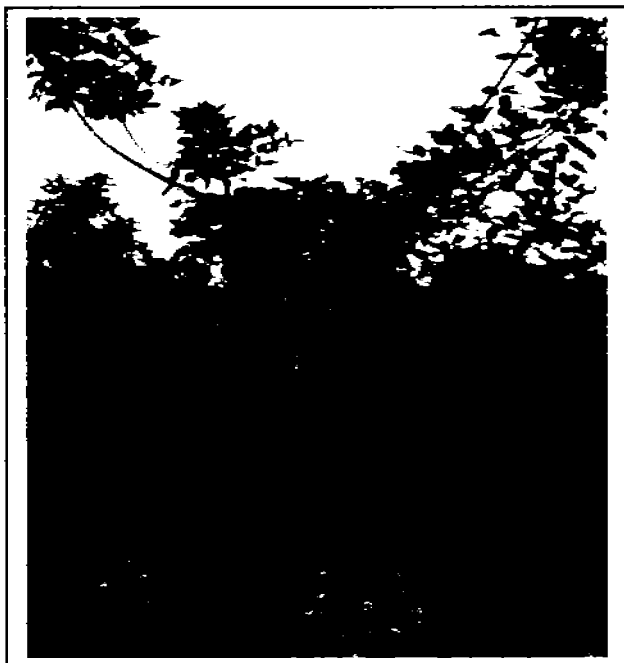


Figura 26.
Establecimiento de una plantación
de café con sombra de la especie
Inga leptoloba

Finalmente el balance hídrico en áreas cafetaleras con y sin sombra ha sido objeto de estudio (figs. 26 y 27). Mehelich, citado por Carvajal, (1984), ha puesto en evidencia que las plantas bajo sombra disminuyen la pérdida de agua por evapotranspiración, en tanto que los valores máximos se registran en el cultivo a pleno sol.

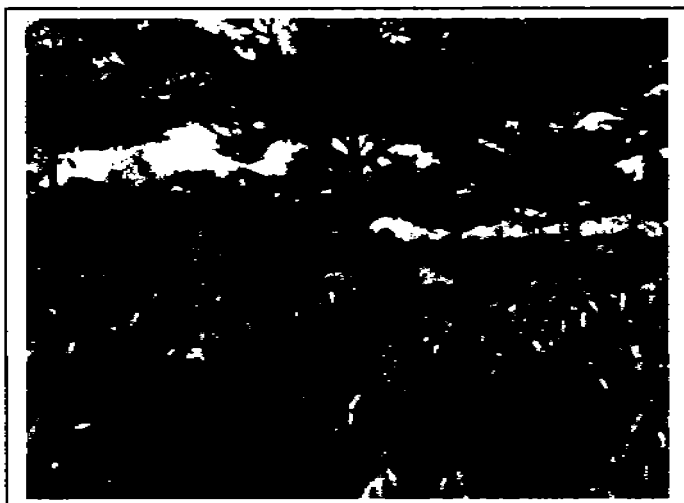


Figura 27.
Establecimiento de una plantación
de café con sombra de *Eritrina*
sp.

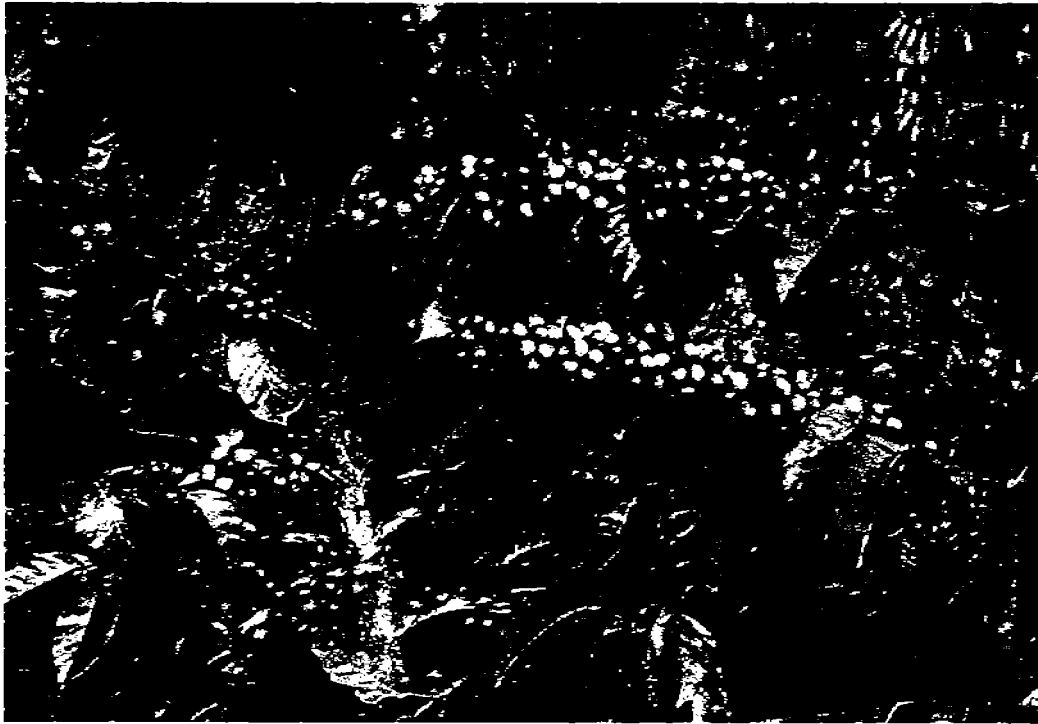


Figura 28. Ramas productoras de café

El cultivo de café agota el suelo, por tanto un análisis del conocimiento de los elementos esenciales aportados por las cosechas permite evaluar más científicamente, las necesidades de fertilizantes de un cafetal (fig. 28) (Carvajal, 1972, 1984; Coste, 1978; Haarer, 1977; Jácome, 1980; Inmecafé, 1990; Valencia, 1999).

La productividad primaria neta en un agroecosistema cafetalero, es el producto de la estabilidad dinámica y se fundamenta en el suministro continuo de la hojarasca, con lo cual se produce un reciclaje de nutrimentos. Estudios de esta clase han sido realizados en México, con el propósito de cuantificar el aporte de la materia orgánica de los cafetaleros, como factor ecológico, para compararlo con la dinámica de un ecosistema forestal, por ejemplo, en los trabajos de Jiménez, (1980), donde se señalan que bajo la influencia de la sombra no se observan diferencias significativas con respecto al bosque caducifolio. Sin embargo, las discrepancias se tornan importantes cuando se incluye la variable del cultivo a pleno sol (Carvajal, 1984.)

De acuerdo a Haarer, (1977), la disponibilidad y la abundancia de nutrimentos deben influir en el vigor y el rendimiento del café. Los árboles obtienen la humedad del suelo y hasta cierto grado pueden absorber humedad a través de las cutículas o de los estomas de las hojas en una atmósfera que sea muy húmeda. La humedad suficiente es esencial y de gran importancia, cuando el crecimiento es exuberante y cuando se están formando los frutos (fig. 28).

Roelofsen y Coohaas, citados por Haarer, (1977), observaron que en las ramas con frutos, las cerezas solas pueden contener el 75% de la cantidad total de potasio presente en

las ramas, 65% del H_2PO_4 y N nitrógeno juntos, 60% del peso seco y del C, 40% del Mg y Mn y 30% del Fe y Ca.

Los fosfatos, el nitrógeno y el potasio alcanzan su máximo en las hojas de los árboles en fructificación cuando han alcanzado su completo desarrollo y expansión, después de lo cual los fosfatos y el nitrógeno disminuyen lentamente hasta la caída de las hojas, pero el K tiende a emigrar del grano a las hojas. En árboles que no están en fructificación, los tres nutrientes disminuyen poco antes de la caída de las hojas. Así mismo cuando se forma una cosecha abundante, todas las partes del árbol deben movilizar sus reservas de nutrientes (Haarer, 1977).

En general, Coste, (1978), cita que se tiende a considerar en cafecultura que los aportes fertilizantes, incluso teniendo en cuenta los coeficientes de utilización (N:50%; P:10%; K:45%), se calculan hasta el presente estrictamente para restituir al suelo las cantidades extraídas por las cosechas para conseguir una nutrición óptima, debido a que cosechas sostenidas de café conducen a un progresivo agotamiento de las reservas del complejo de cambio.

Según Coolí *et al.*, citados por Carvajal, (1984), la determinación de la cantidad de nutrientes que extrae la cosecha de café propiamente dicha, constituye una forma directa de averiguar el aporte al suelo. Los estudios indican que los elementos que suple el substrato en mayor proporción son N y K y en menor proporción P.

Según estos autores, el equilibrio N, P_2O_5 y K_2O tiene en los frutos del cafeto una relación 5.2:1:5.8, (cuadro 9), y señalan que el equilibrio en las fórmulas de los fertilizantes comerciales no debe ceñirse a esta relación, sino que debe contemplar la demanda de nutrientes para el crecimiento vegetativo, la capacidad del suelo para fijar P, NH_4 , K, entre otros.

Cuadro 9. Contenido de nutrientes en 7.14 toneladas de café en cereza madura (*C. arábica*)

Elemento	Cantidad (kg)
N	48.33
P_2O_5	8.36
K_2O	48.07
CaO	11.24
MgO	4.67
S	2.33
Fe_2O_3	0.31
Mn_2O_3	0.030
B_2O_3	0.097

Fuente: Carvajal, (1984).

Carvajal, (1984), señala que la respuesta al NPK varía según el país y según la fertilidad del suelo. Al separar el efecto en la cosecha de cada uno de estos

macronutrientes, se nota en la mayoría de los casos, que el elemento común denominador es el N, mientras que la respuesta a K y a P es variable. Una condición óptima se presenta únicamente en suelos de alto contenido de K y en suelos donde el tenor de P disponible sea superior al nivel crítico requerido (20-30 ppm). Sin embargo dada la gran variabilidad de la fertilidad de los suelos cafetaleros, se requiere la fertilización a fin de obtener óptimos rendimientos.

Mehlich, citado por Carvajal, (1984), sugiere que el cálculo del requerimiento de minerales por el arbusto completo puede ser utilizando los datos de crecimiento hallados por Wormer en plantas de café de tres años de edad, donde se deduce que el equilibrio N:P:K, tiene una relación 10:1:11 en el que el K se destaca como elemento mayoritario. En el cuadro 10, se presentan los requerimientos de nutrientes por cafetos de tres años de edad (*C. arabica*), donde se observa en el follaje la mas alta cantidad de N, P, K, Ca, Mg y S).

Cuadro 10. Requerimiento de nutrientes por cafetos de tres años de edad (*C. arabica*)

Parte de la planta	kg/ha					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Órganos hipogeos + tallo	19.2	2.8	32.9	11.8	2.8	2.8
Ramas	17.9	2.5	23.9	7.5	4.2	1.5
Follaje	66.4	12.6	56.8	23.6	8.5	3.5
Frutos maduros	37.0	3.3	43.3	4.1	4.2	3.1
Totales	140-6	1.2	156.9	47.0	19.7	10.9

Fuente: Mehlich, citado por Carvajal, (1984). Los datos indican los requerimientos a una densidad de siembra de 1345 arbustos/ha y una producción estimada en 1255 kg de café limpio.

Otros autores dan cifras en NPK y Ca, e inclusive en elementos menores. Catani, (1968), reporta que las cantidades de sustancias fertilizantes utilizadas en cuatro años por una hectárea de cafetos (*C. arábica*) en Brasil fue de N 94.7 kg; P₂O₅ 14.4 kg, K₂O 116.8 kg; CaO 76.7 kg; MgO 25.1 kg. El mismo autor observó que la producción de 1,000 kg de frutos por hectárea precisa de la absorción de N 15 kg; P₂O₅ 2.5 kg; K₂O 24.0 kg; CaO 2 kg; MgO 1.0 kg.

Forestier, (1961), da las siguientes cifras para una producción de 2,000 kg de café comerciable: N 30 kg; P₂O₅ 3.75 kg y K₂O 36.5.

La evolución de las necesidades de elementos nutritivos durante el crecimiento y en los diversos estadios de fructificación se han estudiado en las dos especies más importantes. En el *C. arábica*, Catani y Moraes, (1968), han puesto en evidencia una marcadísima progresión especialmente en los años 3º y 4º tras iniciarse la producción.

Snoeck, *et al.*, citados por Carvajal, (1984), han reportado que con 1000 kg/ha de *C. canephora*, se extraen del suelo 33 kg de N, 6.1 kg de P₂O₅, 44.0 kg de K₂O, 5.4 kg de CaO, 4.2 kg de Mg.

Di Fulvio citado por Coste, (1978), considera las siguientes cantidades de nutrimentos extraídos del suelo por 1,000 kgs de café oro y sus envolturas (pulpa y pergamino) (cuadro 11).

Cuadro 11. Contenidos de macro nutrimentos extraídos en 1,000 kg café oro

ELEMENTOS	CONTENIDO EN 1000 kg DE CAFÉ ORO		CONTENIDO EN PULPA Y PERGAMINO
	kg	%	kg
N	16.800	1.68	7.026
P ₂ O ₅	2.897	0.2897	1.077
K ₂ O	14.441	1.4441	14.279
CaO	1.486	0.1486	3.360
MgO	2.299	0.2299	1.193

Fuente: Di Fulvio cit por Coste, (1978).

Las señales de carencia de sustancias fertilizantes pueden observarse en las hojas. Franco y Méndez, (1960) en Brasil, y Lue (1960, 1962), citado por Coste, (1978), tras una serie de observaciones en cultivos carenciales de *C. canephora* en macetas, han demostrado las carencias más comunes (N, P, K, Fe, Ca, Mg, etc.), así como en el *C. arábica*. La carencia de N, que es la más común, se manifiesta por una coloración uniforme amarilla o amarillo verdosa del limbo, en la del P, por un color bronceado y aparición de manchas necróticas; la del K, por una necrosis marginal, etc.

Durante las décadas de los 70's y 80's del siglo pasado, fueron bastante numerosos los trabajos de investigación relacionados con la nutrición de café, con el objetivo de encontrar fórmulas óptimas para la fertilización de café. El incremento de estas investigaciones tuvo el sustento en la enorme inversión de la cafecultura. Muchos de estos trabajos se realizaron en torno a la experimentación de las dosis de fertilizantes, fórmulas completas NPK y los efectos en las aplicaciones suelo. Varios de ellos realizados en institutos de investigación de los diversos países de América Latina y México, como el Inmecafé (México), Cenicafé (Colombia), Anacafé (Guatemala), Instituto Brasileiro de Café (Brasil). En nuestro país, con la crisis de café, el Inmecafé de México, desapareció en la década de los 90's, mientras que los otros institutos en América Latina, siguieron resistiendo los desafíos de la investigación dentro de la vorágine de la crisis económica del café, lo que les ha permitido contribuir con mayor investigación.

Según Carvajal, (1984), una producción alta de café por unidad de superficie solamente puede ser alcanzada mediante la contribución de varios factores: a) uso de variedades superiores, b) densidad de siembra adecuada a un índice de área foliar óptimo, c) renovación sistemática de la madera de producción, d) control fitosanitario, e) renovación total de la plantación una vez que la productividad empieza a declinar, y f) fertilización adecuada e intensiva.

Ortiz, (1973), en Guatemala, señala que el desequilibrio entre la poca disponibilidad de elementos en el suelo, en comparación con las exigencias de la planta de café, empieza a manifestarse en los viveros. Los viveros de café que no se fertilizan, frecuentemente producen plantas de tallo delgado y débil que no logran prosperar al trasplantarse en campo (Ruíz, 1977).

En Brasil, el Instituto Brasileiro do café, donde se cultiva a pleno sol, reportó que una tonelada de café cereza contiene 16.5 kg de N, 1.3 kg de P y 26.0 kg de K. Ellos le dan mayor importancia al N y al K que al P (Coste, 1978)

Después del trasplante, Inmecafé, (1990), recomendó en la práctica una fertilización al suelo con 100 gs de la fórmula 10-10-5 por m², haciendo al mismo tiempo una fertilización combinada foliar.

Carvajal, (1984), cita que en el Estado de Veracruz, México se aplican 120 g de N/arbusto/año. En cuanto a P₂O₅, recomiendan el uso de 80 g, mientras que solamente 40 g de K₂O, cuya aplicación consideran suficiente para incrementar la producción, lo que equivale a la aplicación de 1 kg/planta/año de la fórmula 12-8-4.

La fertilización tiene un lugar importante en el mejoramiento del cultivo del cafeto cuando va acompañada de prácticas adecuadas de control de malezas, poda, regulación de sombra, y cuando se tiene en explotación plantaciones nuevas o rejuvenecidas con abundantes crecimientos que garanticen la respuesta económica al uso de fertilizantes. Licona, (1979), también señala en sus avances, que las producciones, tanto en las parcelas sin fertilizar, como en las que reciben tratamientos fertilizantes son diferentes en cada uno de los lugares de estudio, lo cual señala claramente las diferencias de fertilidad del suelo y la necesidad de realizar trabajos a niveles regionales con objeto de encontrar fórmulas que se ajusten a las condiciones ecológicas de cada región.

Lamentablemente el Instituto Mexicano del Café desapareció y con ello se dejaron de conducirse importantes investigaciones básicas aplicadas en este importante cultivo para México, lo que también dejó a los miles de cafecultores en un abandono en cuanto a la asistencia técnica del cultivo de café.

Carvajal, (1984), destaca que entre los diversos factores que comprende la ecología que tiene que ver con el suelo, es importante el conocimiento que el cafecultor debe tener de las limitaciones o suficiencias de la calidad de los suelos dedicados al café. Además de la fertilidad intrínseca, existe un efecto residual de los fertilizantes el cual debe ser evaluado todos los años, con el propósito de favorecer un abonamiento cada vez más racional, acorde con el menor costo posible, en función de la existencia del cultivo. Señala que entre las características edáficas, el grado de fertilidad del suelo, el pH, el equilibrio entre el Ca, el Mg y el K, la evaluación del contenido disponible de N y P, y del tenor de materia orgánica, constituyen parámetros que un buen cafecultor debe conocer.

Con respecto a la nutrición y la sombra, cuando el cafeto crece a plena exposición solar usa las reservas rápidamente y los frutos a menudo no se desarrollan bien por insuficiencia de minerales. Además con frecuencia ocurre muerte descendente. De acuerdo

a Carvajal, (1984), la especie *C. arabica* parece ser particularmente exigente en nutrimentos cuando se cultiva al sol. Este comportamiento incide en la longevidad de los arbustos, pues las plantaciones al sol por lo general deben ser renovadas en un menor plazo en comparación con aquéllas bajo sombra. Si el suelo es naturalmente fértil el cultivo al sol mostrará siempre ventaja en cuanto a cosecha, en comparación con el cultivo a la sombra, siempre y cuando se añadan los nutrimentos en cantidades apropiadas, se realice un manejo cuidadoso de los cafetos, esto quiere decir que se requiere un plan de fertilización intensivo.

El contenido de nutrimentos en las plantas de café es diferente según se trate de cultivo a sol o a la sombra. Por ejemplo, en la Costa de Marfil se encontró que las hojas de cafetos sombreados eran más ricas en N (20%) y en P_2O_5 (15%) y que contenían menos K (15%) (Coste, 1978). El uso de sombra favorece el mantenimiento de la fertilidad del suelo por varios motivos. En primer lugar el ambiente que produce disminuye la temperatura del suelo, lo que reduce las pérdidas de N que se registran a temperaturas altas como consecuencia de la descomposición rápida del humus. Por otra parte disminuye la intensidad del lavado de nutrimentos del suelo. Cabe añadir que los árboles de sombra tienen una acción fertilizante directa e indirecta. El efecto se ilustra por la adición prácticamente continua de materia orgánica (descomposición de la hojarasca). Un ejemplo de la acción fertilizante indirecta, está dado por el aporte de N con que contribuyen las leguminosas (Carvajal, 1984).

Ejemplos del uso cuidadoso del cultivo a sombra o al sol, lo señala Pérez, citado por Carvajal, (1984), quien señala que no obstante un aumento de un 35% en producciones sostenidas del cultivo al sol, tal aumento no justificó recomendar la eliminación de la sombra en la región por el alto porcentaje de fruto que maduraba anormalmente ya que ocurrió mucha abscisión a causa de la incidencia de la Chasparría (*Cercospora coffeicola* Berk et Cooke). Lo anterior se tradujo en un grano de baja calidad, al punto que en la mayoría de los casos los beneficiadores recibían el café como si fuese verde.

Aún falta mucho por estudiar en relación a la nutrición del cafeto bajo condiciones de cultivo de sol y de sombra, no solamente desde el punto de vista nutricional, sino también en relación a otros factores convergentes que entran en juego al tratar de intensificar la producción del café, como los aspectos ecológicos, que tienen que ver con el mantenimiento de los ciclos biogeoquímicos obtenidos en este agroecosistema con el manejo de sombra y los aportes de N atmosférico capaces de ser fijado por árboles de sombra. Sylvain, citado por Carvajal, (1984), señala que la sombra constituye una especie de seguro para evitar pérdidas económicas en este cultivo.

Por lo anterior, el conocimiento del reciclaje de nutrimentos que tiene lugar, tanto en condiciones de sol como de sombra, constituye un imperativo en la investigación de la cafeticultura.

En cuanto al método y época de aplicación de los fertilizantes, según Carvajal, (1984), en general, las fuentes de N exhiben toda una alta solubilidad y una excelente movilidad dentro del suelo. Los fertilizantes potásicos también tienen alta solubilidad, pero su disponibilidad para las plantas depende de la cantidad y del tipo de arcilla predominante que conforman el suelo, mientras que el comportamiento del P es diferente, no precisamente por la solubilidad aceptable de la mayoría de las fuentes comerciales, sino por

la disponibilidad del ión fosfato una vez que se solubiliza (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}), el cual es fijado en el suelo, por fracciones orgánicas e inorgánicas, dependiendo del origen del suelo, de la reacción del suelo, de las arcillas, etc., tema que se trata más adelante.

La época más adecuada para la aplicación de abonos al café ha sido objeto de mucho estudio. De acuerdo a las revisiones que sobre éste tema hace Carvajal, (1984), se coincide en la opinión de subdividir la dosis de N en tres aplicaciones por año y en una o dos las de P y K (una es menos común). Señala que la primera debe ser al inicio de la estación húmeda y aproximadamente dos meses después, se aconseja suministrar fórmulas que contienen NPK con algún suplemento de Mg y B si fuese necesario. La tercera aplicación de N sólo, recomiendan hacerla al final de la estación lluviosa.

Según este autor, esta modalidad practicada en la mayoría de los países presenta una excepción en Kenya, en donde la aplicación de N se aconseja hacerla cuatro veces al año, dependiendo de la región. Destaca también el hecho de que durante el período lluvioso tiene lugar una absorción más o menos alta y simultánea de N, P, K, Ca y Mg y que en ese momento la planta absorbe N en cantidades comparativamente mayores, también durante la maduración de la cosecha, mientras que en la prefloración la planta absorbe mayores cantidades de K.

2.3.5 LOS MACRO Y MICRONUTRIMENTOS EN LA NUTRICIÓN MINERAL DEL CAFÉ

Uno de los aspectos básicos de la fertilidad en los suelos volcánicos es el abasto de nutrimentos esenciales para los cultivos.

Debido a las características físicas, químicas y biológicas de estos suelos, heredados de las condiciones minerales de las rocas y cenizas volcánicas, pueden variar en su composición (ácida, intermedia ó básica) y proporción mineral: feldespatos de albita, anortita, biotita, olivino, hornblenda, augita y otros, los cuales son la materia prima de elementos como: N, P, K, S, Ca, Mg, K y de los microelementos como Mn, Cu, Zn, Bo, Mo y otros (Egawa, 1977; Parfitt, 1985; Besoain *et al.*, 2000; Quantin, 1986; Shoji *et al.*, 1993).

Los estudios sobre la composición química del café y su producto, prueban que los elementos esenciales para la nutrición del café son el N, P y K (Carvajal, 1972, 1984; Coste, 1978; Haarer, 1977; Valencia, 1998, 1999).

En el cuadro 12, citado por Valencia y Arcilla, (1977), se dan los valores más comunes de NPK y otros micro nutrimentos encontrados en hojas de café.

Cuadro 12. Concentraciones "normales" de nutrientes minerales en hojas de *Coffea arabica* para diferentes países, de acuerdo a varios autores

Referencia	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	Mn ppm	B ppm
Southern (Nueva Guinea)	2.6-3.0	0.13-0.19	1.8-2.6	0.6-1.6	0.4-0.7	-	-
Machado (Colombia)	2.5-3.0	0.11-0.15	1.5-1.8	0.7-1.3	0.35	200	-
Valencia y Arcila (Colombia)	2.3-2.8	0.10-0.18	1.5-2.0	0.50-1.30	0.30-0.40	150-220	40-60
Chavarri et al (Costa Rica)	2.3-2.8	0.12-0.20	1.7-2.7	1.1-1.7	0.20-0.35	50-150	60-100
Bénac (Camerún)	4.0	0.20	2.8	1.0	0.50	-	-
Culto (Kivi)	3.0	0.20	1.8	1.10	0.20	-	-
Malavolta (Brasil)	3.0	0.21	1.73-1.90	1.0	0.24-0.25	51	77

Fuente: Valencia y Arcila, (1977)

2.3.5.1 Macro y micronutrientes

El N determina un desarrollo rápido de la vegetación de los tallos, de las hojas, fácil de observar, que da la impresión de que basta utilizar este abono para obtener cosechas de buen rendimiento económico. Sin embargo sin ácido fosfórico para mantener su acción, el N promueve una alta producción de los tallos y de las hojas, con perjuicio de las frutas, los granos, las raíces. Además, prolonga la vegetación y atrasa la maduración de los productos en la cosecha. Así mismo, sin K, los rendimientos de los cultivos en peso son inferiores a los que se obtienen con los 3 elementos, y la calidad de las cosechas pierde su valor. Parece ser que una relación de 1 de N para 2 de P_2O_5 y 1 de K_2O , es recomendable en la mayoría de los casos (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Valencia, 1998, 1999).

En el cuadro 13, se presentan los datos de los niveles alto, medio y bajo, considerados en otros países cafetaleros como contenido foliar de nutriente para su comparación.

Cuadro 13. Ámbito de la composición mineral del cuarto par de hojas del cafeto (*C. arabica*, L.) en distintos países. Datos expresados en base seca

NUTRIMENTO	PAIS			
	COSTA RICA	BRASIL	COLOMBIA	HAWAI
N	%	%	%	%
Alto	>2.80	>3.40	>3.00	>3.25
Medio	2.30-2.80	3.00-3.40	2.50-3.00	2.00-3.25
Bajo	2.00-2.30	<3.00	3.00-2.50	-
Deficiente	<2.00	-	<2.00	-
P	%	%	%	%
Alto	>0.20	>0.12	>0.15	-
Medio	0.12-0.20	0.10-0.12	0.11-0.15	0.08-0.15
Bajo	0.09-0.12	<0.10	<0.11	-
Deficiente	<0.09	-	-	-
K	%	%	%	%
Alto	>2.70	>2.30	>1.80	>2.00
Medio	1.70-2.70	1.90-2.30	1.50-1.80	1.00-1.80
Bajo	1.00-1.70	0.80-1.90	1.10-1.50	0.80-1.00
Deficiente	<1.00	<0.80	<1.10	<0.80

Fuente: Carvajal, (1972), Malavolta, (1981)

En el cuadro 14, se muestran resultados de un ensayo donde se dan los porcentajes foliares en tres variedades de café (Hiroce, 1981). Estos datos muestran que estas variedades con muy pocas variaciones tienen las mismas demandas los macronutrientes, N, P y K.

Cuadro 14. Valores de nutrientes N P K, en hojas de cultivares de café Mundo Novo, Bourbon y Caturra en un suelo podzólico de Brasil

Elemento en las hojas	Mundo Novo	Bourbon	Caturra
N%	2.57	2.5	2.58
P%	0.133	0.131	0.131
K%	2.14	2.19	2.02

Fuente: Hiroce, (1981)

En el cuadro 15, se muestran los datos de valores de nutrientes en hojas de café Mundo Novo en relación a las épocas de muestreo, citadas por Hiroci, (1981).

Cuadro 15. Nutrientes en hojas de café Mundo novo en relación a las épocas de muestreo

Elemento en las hojas	Verano	Otoño	Primavera
N%	2.73	2.65	2.83
P%	0.157	0.137	0.154
K%	2.03	1.98	2.13

Fuente, Hiroci, (1981)

De acuerdo a Carvajal, (1984), una producción alta de café por unidad de superficie, solamente puede ser alcanzada mediante la contribución de varios factores: a) uso de variedades superiores; b) densidad de siembra adecuada a un índice de área foliar (IAF) óptimos; c) renovación sistemática de la madera de producción, d) control fitosanitario; e) renovación total de la plantación una vez que la productividad empieza a declinar; y f) fertilización adecuada e intensiva.

Este autor, también señala que el propósito de la adición de fertilizantes al cafeto es suplir elementos minerales esenciales en cantidad adecuada para el máximo cumplimiento de los ciclos vegetativo y reproductor, ya que los suelos en general son incapaces de suplir todos los elementos requeridos en cantidad suficiente, y, sobre todo, durante muchos años de cultivo.

Con respecto al estudio de la carencia de los nutrientes sobre la absorción por el cafeto, señala también Carvajal, (1984), que se observan ciertos contrastes: la deficiencia de N causa una disminución en la absorción de prácticamente todos los demás excepto de Ca. La de P disminuye la absorción de N y Mg, mientras que la de K no sufre y la de Ca se incrementa. La deficiencia de K causa especialmente una disminución de la absorción de N, al tiempo que sube la de Ca. La falta de Ca afecta negativamente la absorción de N, P y Mg. La deficiencia de Mg provoca una disminución de la absorción de N y S, mientras induce un aumento en la absorción de Ca. La falta de S disminuye la absorción de N y Mg y aumenta la de Ca.

A continuación se presenta los principales macro nutrientes requeridos por las plantas de café y la función que desempeñan en la fisiología de la planta.

2.3.5.1.1 Nitrógeno (N)

Probablemente el papel más importante del N en las plantas es su participación en la estructura de la molécula proteica. El N se encuentra en moléculas importantes como las purinas, pirimidinas, porfirinas y coenzimas. Las purinas y las pirimidinas se encuentran en los ácidos nucleicos RNA y DNA, esenciales para la síntesis de proteínas, responsables de la transferencia de la información genética. El anillo de la porfirina se encuentra en compuestos tan importantes desde el punto de vista metabólico, como las clorofilas y las enzimas del grupo de los citocromos, esenciales para la fotosíntesis y la respiración. Las coenzimas son indispensables para el funcionamiento de muchas enzimas. Otros

compuestos de las plantas contienen N (por ejemplo algunas vitaminas) (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Valencia, 1998, 1999).

El aporte de N procedente de la atmósfera, mediante la contribución de bacterias que viven en simbiosis en las raíces de especies leguminosas como árboles de sombra en los cafetales, de los géneros *Inga*, *Acacia*, *Albizzia*, *Leucaena* y *Eritrina*, y representan cerca de un 25% de economía en la fertilización anual cuando se trabaja bajo el sistema de sombra. Este hecho apunta la importancia de contar con una densidad adecuada de árboles de sombra/unidad de superficie, con el propósito de propiciar una distribución uniforme de N en todo el terreno y disminuir la intensidad lumínica aproximadamente en un 60% (Carvajal, 1984; Inmecafé, 1990).

El N desempeña un papel primordial en el metabolismo del crecimiento de cafeto, y más tarde en la formación de las ramas jóvenes y de las hojas, y en la actividad fotosintética de estas últimas, por lo que se cita que su papel primordial es el desarrollo vegetativo. Regula la absorción del P y el fortalecimiento de las raíces. (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Valencia, 1999).

La nutrición hidrocarbonada, y por tanto la fructificación, estará tanto más asegurada cuando más satisfactoria sea ésta. En los períodos de sequía, esta nutrición puede ser deficiente, lo que se traduce en una coloración amarillenta del follaje y la aparición de casos de desecación en las extremidades de las ramas; el mismo fenómeno puede observarse cuando el cafeto está sobrecargado de frutos (Carvajal, 1972, 1984; Uribe-Henao *et al.*, 1976; Haarer, 1977; Coste, 1978; Valencia, 1998, 1999).

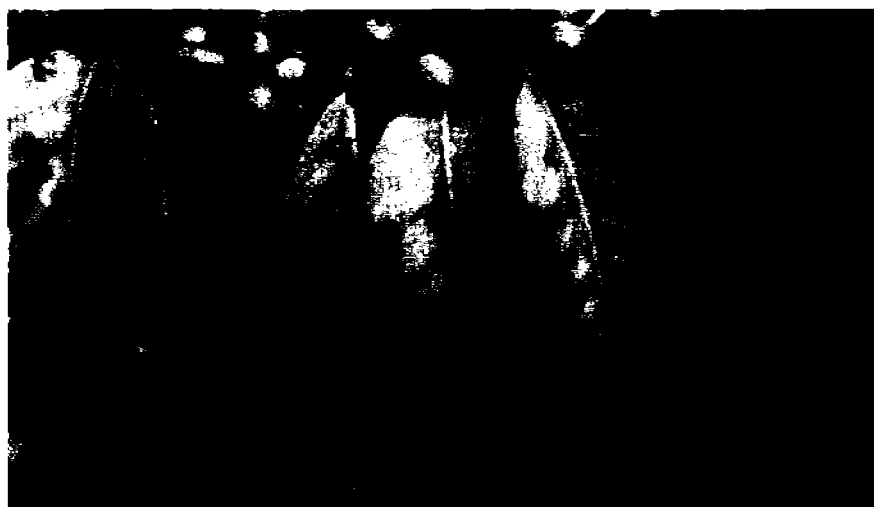


Figura 29.
Hojas
amarillentas
con deficiencia
en N

El nivel de N de las hojas ha sido determinado por el diagnóstico foliar en el adulto, alrededor de 2.25 a 3.0% en cafeto adulto, siendo el nivel crítico de 1.8 a 2.0%. (Valencia y Arcila, 1977, Coste, 1978).

Forma también parte de la clorofila, por lo que su deficiencia en la planta se manifiesta por la pérdida uniforme del color verde de las hojas (fig. 29), hasta alcanzar un tono amarillo cuando la deficiencia es muy severa. En general, este síntoma empieza a

notarse en las hojas más maduras y aparece en último lugar en las superiores sometidas a un crecimiento más activo. Esta aparición de los síntomas de deficiencia en N se debe a la elevada movilidad del N en la planta. Las hojas jóvenes retienen su N, y absorben N procedente de las hojas más viejas. En condiciones de deficiencia aguda en N, las hojas más inferiores de la planta se secan y amarillean y en muchos casos se desprenden, y las hojas superiores suelen presentar un color verde pálido (Carvajal, 1972, 1984; Uribe-Henao, 1976; Valencia, 1999).

Una interesante característica de la deficiencia en N que presentan muchas plantas es la producción de pigmentos distintos de la clorofila cuando falta N. Por ejemplo puede observarse una coloración purpúrea en los pecíolos y nervios de las hojas debida a la formación de antocianos. Esta respuesta a la deficiencia en N puede observarse también en los tallos (Valencia y Arcila, 1977, Coste, 1978).

El N es absorbido por las raíces de las plantas en forma de ión NO_3^- (nitrato) y NH_4^+ (amonio), principalmente y que se convierten continuamente en compuestos orgánicos. Experimentan gran movilidad en la planta (Harrer, 1977; Coste, 1978; Malavolta, 1981).

2.3.5.1.2 Fósforo (P)

El fósforo (P) solo se encuentra en la naturaleza en estado de combinación química, formando diversos compuestos, nunca como elemento libre. Se trata de un constituyente esencial de la materia viva, animal o vegetal particularmente abundante en los núcleos de las células, en los que forma las núcleo-proteínas, las cuales pueden contener hasta un 10% de P (Valencia y Arcila, 1977, 1999; Coste, 1978; Fixen, 1994).

El principal compuesto energético de todo ser vivo es a base de P. Los cromosomas y el material genético son ricos en P. Su existencia es fundamental para la formación de los genes y cuando escasea, la división de las células o se disminuye o se interrumpe, por lo que se puede afirmar que sin el P no podrían asegurarse la supervivencia de todo ser vivo, humanos, animales ni plantas (Griffith, 1985).

El papel del P en la nutrición de plantas y animales es muy complejo, pero juega un papel muy importante en su fisiología. Una suficiencia de este elemento es indispensables ya que el P una vez absorbido, es fácilmente trasladado de las hojas adultas a los frutos y posiblemente a las hojas jóvenes por lo cual tiene un papel central formando parte de los ácidos nucleicos, la fitina, los fosfolípidos, los azúcares, vitaminas, de las coenzimas NAD y NADP el cual es especialmente importante como integrante del ATP, en las nucleoproteínas, en la activación de los aminoácidos, tiene un papel importante en las reacciones de oxidación-reducción en donde tiene lugar transfencias de hidrógeno. Procesos metabólicos tan importantes como la fotosíntesis, glucólisis, respiración y síntesis de ácidos grasos y albúminas dependen de estas coenzimas. Participa en la maduración de las frutas y semillas, influye en el desarrollo de las raíces, particularmente de las laterales, por lo que una severa deficiencia en cultivos perennes como el café, pueden llegar a

producir severos desequilibrios que conducen a un mal crecimiento y deficiente nutrición y fructificación. (Malavolta, 1981; Pérez y Mury, 1992). Además una deficiencia por este nutrimento y otros elementos, hace más susceptibles al ataque de hongos en este cultivo especialmente la roya del café *Hemileia vastatrix*. La importancia del ATP como compuesto transportador de energía es incuestionable (Carvajal, 1972, 1984; Uribe-Henao, 1983; Guridi *et al.*, 1985; Inmecafé, 1990; Fixen, 1994).

La lecitina es otro compuesto orgánico fosforado asociado con la formación de aceites y grasas. Por ejemplo las semillas de maíz contienen ordinariamente un 5% de aceite, del cual 1.5% es lecitina (Jácome, 1980).

El P se encuentra en otros compuestos de la planta, pero éstos se consideran menos importantes. En los tejidos meristemáticos de la planta, de un activo crecimiento, se encuentran fuertes concentraciones de P, que interviene allí en la síntesis de nucleoproteínas. El P no sólo se encuentra en la fracción correspondiente a la molécula de la nucleoproteína, sino que interviene a través del ATP, en la activación de los aminoácidos que intervendrán en la síntesis de la parte proteica de este compuesto. Además de las proteínas, los fosfolípidos son importantes constituyentes de las membranas celulares (Carvajal, 1972, 1984; Uribe-Henao, 1983; Guridi *et al.*, 1985; Fixen, 1994).

Su estrecha relación con la multiplicación celular explica su presencia en las semillas, las que no llegan a formarse en ausencia de por lo que se puede afirmar que todas las semillas son ricas en P. Fisiológicamente el hecho es muy importante porque este elemento está relacionado con los fenómenos de la germinación, durante los cuales participa en los procesos críticos iniciales de la vida, asegurando la conservación de las nuevas plantas. Con las grasas y las albúminas sucede lo mismo; en cambio, los almidones si se forman pero no se convierten fácilmente en azúcares (Jácome, 1980).

Un abastecimiento adecuado del P en el período de desarrollo inicial de la planta es indispensable para la formación de las partes reproductivas. Especialmente en el momento de la inducción floral y de la floración. La fructificación y maduración están íntimamente ligadas al P (Haarer, 1977; Valencia y Arcila, 1977, 1999; Coste, 1978; Fixen, 1994).

En el café, varios autores han afirmado que existe una relación directa en la calidad de la bebida y los nutrimentos. Por ejemplo Amorin *et al.*, (1968), citados por Malavolta, (1981), señalan que una deficiencia de P, o un exceso de N y de K, causan disminuciones significativas en la calidad de la bebida.

Estimula el desarrollo inicial de raíces, ayudando así en el establecimiento rápido de las plántulas. Origina un comienzo rápido y vigoroso de las plantas. Los fosfatos favorecen la maduración temprana de los cultivos, estimula la floración y ayuda en la formación de la semilla, por lo que mejora la calidad de los granos (Valencia y Arcila, 1977, 1999; Coste, 1978; Uribe-Henao, 1983; Fixen, 1994).

La formación de los granos se inicia prontamente cuando los fosfatos solubles están en proporciones de suficiencia. Cuando todos los factores de crecimiento son adecuados, frecuentemente se logra acortar hasta en una semana completa el ciclo vegetativo. Este

efecto se atribuye a la estrecha relación que guarda el P con la producción de semillas. Las plantas no alcanzan su maduración y no producen semillas a menos que dispongan de P aprovechable, por lo que no es sorprendente encontrarlo siempre en grandes cantidades en las semillas, mejor que en los restantes órganos vegetales (Carvajal, 1972, 1984; Dunald, 1961; Fixen, 1994; Monge, 1999).



Figura 30.
Deficiencias de
P en hojas de
café

En la figura 30, se observa la deficiencia típica de P en hojas de café. Debido a la elevada movilidad del P en la planta, las hojas más viejas son las que suelen presentar los síntomas de deficiencia, mientras que las hojas jóvenes tienden a privar a las hojas más viejas de los elementos móviles (Carvajal, 1972, 1984; Uribe-Henao, 1983; Muñoz, 1984). Las hojas pasan de clorosis leve, uniforme, color verde limón opaco, hasta que se torna más amarillenta en hojas viejas. Estas a menudo muestran una clorosis lobular entre las venas. Cuando la deficiencia es muy severa algunas hojas adultas presentan áreas y puntos necróticos en el ápice y en los bordes; los puntos se distribuyen irregularmente y los de mayor diámetro aparecen rodeados de una areola amarilla. En una deficiencia muy severa una necrosis café rojizo avanza considerablemente y se extiende del ápice hacia el interior de la lámina. Un déficit hídrico severo provoca una necrosis muy semejante a la que produce una deficiencia avanzada de P (Carvajal, 1984).

El efecto equilibrante sobre la acción del N y del K es una función reconocida del P, por lo cual es indispensable la adición en todas las fórmulas de fertilización. En cultivos donde se apresura la maduración, es indispensable dosis suficientes de P, que aumenten el desarrollo de las raíces y que promuevan la resistencia a las enfermedades a fin de lograr una buena floración y la fructificación (Carvajal, 1972, 1984; Uribe-Henao, 1983; Muñoz, 1984; Valencia, 1998).

En una planta cultivada el contenido de P varía de 0.20 a 0.30 % sobre el peso seco, de tal valor, de un 60 a 75% es soluble en agua. De acuerdo a varios autores (Coste, 1978;

Pérez, R. y Mury, 1992), las cantidades críticas por término medio se sitúan alrededor de 0.12 a 0.15%, y recomiendan aplicar dosis de mantenimiento, sólo si el P está bajo de esos porcentajes. Las señales de carencia aparecen cuando éstas son mucho muy reducidas (0.07 a 0.10%).

Cuadro 16. Valores indicativos del estado del P en análisis de tejidos del café

Planta	Condiciones de cultivo	Tipo de muestreo	Edad, estado, condición o dato del muestreo	Rangos en materia seca (%)				Referencias
				Rangos de los síntomas de deficiencia	Bajo rango	Rango intermedio	Rango alto	
Café	Campo	Hojas	Madurez Verano	<0.08	-	0.13-0.15	>0.15	Loué (1954)
	Campo	Hojas	3ª. Hoja del ápice		<0.20	0.20-0.30	>0.30	Malavolta y Gómez (1961)
	Solución	Hojas	1 mes de edad	0.06		0.21	0.22	Malavolta y Gómez (1961)
	Solución	Hojas	3 meses de edad	0.05		0.031	0.38	Malavolta y Gómez (1961)

Fuente: Bingham, (1973).

En el cuadro 16, se señalan los valores a nivel foliar citados por varios autores en Bingham, (1973). También Dunald, (1961), señala intervalos de 0.15 a 0.2, para concentraciones normales de hojas del cuarto nudo, señalando como nivel crítico en las hojas <0.1, mientras que Muller, (1959), menciona que de 0.1-0.08% se considera como nivel crítico, debajo de 0.12% como deficiente y de 0.15-0.20% lo considera alto.

Muchos de los síntomas de deficiencia en el P pueden ser confundidos con los de la deficiencia en N. De modo parecido a la deficiencia en N, la deficiencia en P puede provocar la caída prematura de las hojas y la pigmentación antociánica púrpura a roja, existiendo mayor susceptibilidad al ataque de hongos. A diferencia del N, las plantas que carecen de P pueden presentar zonas necróticas (muertas) sobre las hojas, pecíolos o frutos, un aspecto general achaparrado, y las hojas pueden adquirir una coloración característica oscura o azul verdosa (Carvajal, 1972, 1984; Malavolta, 1981; Valencia, 1998, 1999).

Una correlación positiva existe entre el P y el N. Si el P es bajo en cantidad, se afecta el aprovechamiento del otro. (Carvajal, 1972, 1984; Valencia, 1998, 1999).

Es absorbido por mecanismos activos en las raíces en forma de ión HPO_4^{2-} y H_2PO_4^- y forman rápidamente compuestos orgánicos, principalmente hexosas fosfatadas. Una vez absorbido experimenta gran movilidad en la planta. La capacidad de absorción de P, según señala Carvajal, (1984), difiere entre especies e inclusive entre variedades (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Malavolta, 1981; Valencia, 1998, 1999).

2.3.5.1.3 Potasio (K)

Se señala como el elemento más importante en los frutos y en las semillas, lo que confirma su alto requerimiento. Su presencia es también indispensable, en el endurecimiento y resistencia de los tejidos de sostén, como el tallo y las ramas por lo que se considera indispensable en el armazón del cafeto, produciendo estructuras más fuertes y resistentes al acame. (Haarer, 1977; Coste, 1978; Ortiz, 1978; Carvajal, 1984, 1984; Valencia, 1998, 1999).

Carvajal, (1984), señala que el K afecta procesos metabólicos muy variados, como fotosíntesis, respiración, síntesis de la clorofila, respiración. Es importante pues produce mayor vigor y resistencia a las enfermedades en las plantas. Aumenta el tamaño de granos y semillas. Esencialmente participa en la formación y transferencia de almidón y azúcares. También señala que el K regula las condiciones de agua dentro de las células de la planta y las pérdidas de agua por transpiración. Actúa como acelerador de la acción de enzimas.



Figura 31.
Deficiencia de
potasio

En la figura 31, se observa la deficiencia del K en café. Las hojas adultas más viejas presentan una clorosis amarillenta, a manera de una banda cerca del borde; las venas pueden mostrar igual coloración. Un halo amarillento limita la necrosis del borde y del ápice foliar (Carvajal, 1984).

Bajo condiciones de campo, las hojas deficientes en K son susceptibles a debilitarse, sufrir una fuerte defoliación y ser parasitadas por los hongos (fig. 32). La deficiencia se caracteriza por la muerte del tejido de la hoja, principiando por el ápice (punta) y extendiéndose por los bordes, observándose una demarcación bien definida entre el tejido muerto y el tejido vivo. (Haarer, 1977; Coste, 1978; Ortiz, 1978; Carvajal, 1984, 1984; Valencia, 1998, 1999).

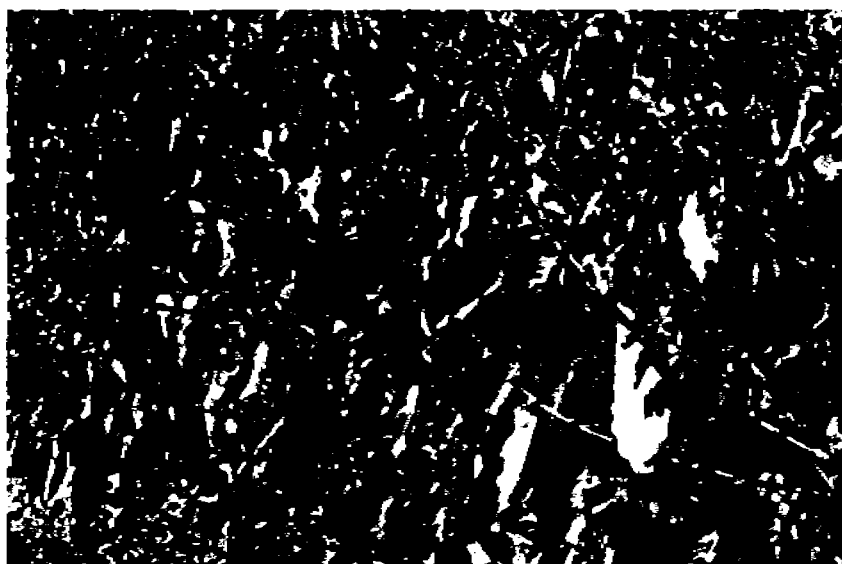


Figura 32. Plantas de café con deficiencias de potasio.

Se ha observado una relación antagónica entre el N y el K. Un exceso del primero puede inducir una deficiencia del segundo o viceversa, por lo que debe de existir un equilibrio entre éstos. También existen relaciones antagónicas entre el K, el Ca y el Mg (Malavolta, 1981; Carvajal, 1984, 1984; Valencia, 1998, 1999).

El nivel de este elemento en las hojas es por término medio de 1.80 a 2.20% en el adulto; las cifras críticas varían mucho según los autores y según las especies: 0.25 a 1.60% (Carvajal, 1984).

El K es asimilado por las raíces como ión K^+ tanto de la solución del suelo como de las posiciones de intercambio de arcilla (Carvajal, 1984).

2.3.5.1.4 Calcio (Ca)

Otros elementos, especialmente Ca, son de especial importancia porque por debajo de un determinado umbral, aparecen síntomas de carencia que repercuten en la vegetación y fructificación.

El Ca es un constituyente de la pared celular de la planta, en forma de pectato de Ca, promueve el desarrollo de raíces, neutraliza ácidos orgánicos, activa los puntos de desarrollo especialmente en las puntas de raíces. No se mueve de las hojas viejas a las jóvenes, por lo cual la deficiencia aparece en puntos de crecimiento. Afecta la absorción de otros nutrimentos, especialmente N y fomenta la producción de semillas (Haarer, 1977;

Coste, 1978; Malavolta, 1981; Carvajal, 1984, 1984; Valencia, 1998, 1999). De acuerdo a estos autores, los síntomas típicos son la clorosis marginal de las hojas jóvenes junto con la marchitez de los puntos de crecimiento. Sus concentraciones se sitúan de 0.80 a 1.4%. Es asimilado como ión Ca^{++} .

Las hojas jóvenes presentan un color verde pálido cerca de los bordes; a lo largo de la vena central permanece el color verde. Entre las dos zonas se destaca una zona bronceada de límites difusos. Se presentan puntos necróticos de tamaño diminuto y de un color rojo ladrillo (bronceado) localizados en el haz, entre una zona verde pálido hacia los bordes y una verde típico cerca de la vena central. Las hojas adultas pierden su condición de erectas, de modo que, sin llegar hasta la abscisión, quedan colgando hacia abajo (Malavolta, 1981).

2.3.5.1.5 Magnesio (Mg)

Carvajal, (1984), señala que entre las funciones del Mg se destacan su participación en la fotosíntesis y en el metabolismo de los carbohidratos (glicólisis). Se ha demostrado que la integración de los ribosomas requiere de Mg. Como elemento esencial está asociado a un número de funciones fisiológicas y bioquímicas, en reacciones que promueven la transferencia de grupos fosfato, en especial en las correspondientes al paso de la glicólisis que involucran la transferencia de adenosin trifosfato (ATP). Señala este autor, que la formación de compuestos entre Mg y AMP, ADP y ATP tiene relación con el complejo de hidrólisis de estas moléculas.

Las hojas adultas exhiben una clorosis (fig. 33), que en casos severos se torna de color amarillento paja, mate, que se destaca en la región comprendida entre la venación primaria. También se presentan puntos necróticos de color café rojizo y forma angular (Malavolta, 1981).



Figura 33. Deficiencia de Mg.

Fuente: Carvajal, (1984)

2.3.5.1.6 Micronutrientos

En los últimos años se ha concedido particular atención a los elementos menores ó micronutrientos: Mn, Fe, B, zinc, Al, etc., aunque hay pocas investigaciones sistemáticas en éste que se refieran al cultivo de café. En casos de grave deficiencia se ha comprobado que, con solo el aporte de la sustancia causal, se consigue restablecer un buen nivel de fertilidad (Malavolta, 1981; Carvajal, 1984; Muñoz, 1984; Valencia, 1998, 1999).

Al respecto Guerrero y Burbano, (1972), señalan en su revisión de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Colombia, la acción acomplejante de la alófana sobre la materia orgánica, como causante de una acentuada disminución en la disponibilidad de Cu, Zn y Mn. También Valencia y Franco, (1985), citan que la disponibilidad de los micronutrientos catiónicos es afectada por factores como: altas aplicaciones de fertilizantes nitrogenados que pueden afectar la disponibilidad del Zn y producir deficiencias de Cu, mientras que el encalamiento de suelos ácidos tiende a disminuir la disponibilidad de Cu-Zn-Mn y Fe y que una alta dosis de fertilización fosfatada puede producir deficiencia de Cu y afectar negativamente la disponibilidad del Zn.

2.3.6 FERTILIZACIÓN MINERAL Y ORGÁNICA EN SUELOS CAFETALEROS

El número de ensayos realizados en todo el mundo tropical para determinar la naturaleza, las dosis y las épocas de aplicación de los fertilizantes en suelos cafetaleros, es muy elevada, pero solamente un pequeño número de ellos efectuado en condiciones experimentales rigurosas, interpretables estadísticamente, pueden considerarse válidos. Las necesidades del cafeto varían mucho según la especie y variedad (razas y clones), la edad de los arbustos, el medio ecológico, las técnicas de cultivo, altitud, etc. (Carvajal, 1984).

Cultivos de plantación, y en particular los cafetales, conducen a un progresivo agotamiento de las reservas del complejo absorbente aún en los mejores suelos, como los volcánicos. Por otra parte, ninguno de los elementos actúa aisladamente, las interacciones son la regla y su complejidad se añade a las dificultades que existen para la búsqueda de una fórmula de fertilización (Licono, 1979, Malavolta, 1981, Bravo, 1984, Valencia, 1998, 1999).

2.3.6.1 La fertilización mineral

En general, se tiende a considerar en cafeticultura que los aportes fertilizantes, incluso teniendo en cuenta los coeficientes de utilización (N 50%, P 10%, K 45%), se calculan hasta el presente, estrictamente para restituir al suelo las cantidades extraídas por las cosechas para conseguir una nutrición óptima. Esto conduce a un progresivo agotamiento de las reservas del complejo absorbente (Regalado, 1996; Valencia, 1998, 1999).

En la zona cafetalera del Soconusco, Edo. de Chiapas, donde las precipitaciones medias son de 3,500 a 4,000 mm anuales (algunos años se han alcanzado cifras elevadas, arriba de los 6,000 mm) las pérdidas de sustancias minerales en los suelos son mucho más importantes de lo que se supone, tanto si son consecuencia de una lixiviación intensiva, como de un arrastre a las capas profundas, de un proceso de insolubilización, de la capacidad de intercambio, etc. Por ello, la fertilización junto con la aplicación de los conocimientos agroecológicos de este medio tropical, son elemento clave en la relación suelo-planta-productividad (Ramos, 1973, 1982, 1984).

Carvajal, (1984), señala que la fertilización científica del cafeto debe responder al imperativo que dicta la crisis energética por la que atraviesa el mundo, poniendo en práctica un abonamiento racional, económico, equilibrado y por tanto rentable para el cafeticultor, el cual desafortunadamente ha visto disminuido los beneficios económicos con este cultivo, por las políticas de mercado. Añade también este autor en una revisión amplia de investigaciones que cita en su obra, que la investigación básica sobre el nivel crítico de los nutrimentos o de los tenores bajos, medios y altos, es relativamente amplia en relación al cafeto.

2.3.6.2 La fertilización orgánica

Los estudios de la fertilización orgánica del cafeto, son muy fructíferas, pero costosas. Se pueden señalar también la importancia en la aplicación de los abonos verdes, representados por numerosas leguminosas cultivadas en las interlíneas y enterradas en cierto estado de su desarrollo (Malavolta, 1981; Carvajal, 1984).

El estiércol de granja o gallinaza en cafecultura en las regiones en que hay cría de animales domésticos a las dosis de 20 a 30 t/ha, con frecuencia por rotación (un año de cada dos ó un año de cada cuatro), han resultado óptimos (Fischersworing *et al.*, 2001).

A falta de estiércol o gallinaza, la utilización de los residuos del beneficiado del café, en forma de composta es también muy recomendable. Los intentos de estercolados en cantidades altas muy superiores a las necesidades teóricas, cuyos resultados son bastante recientes, confirman esta opinión con un aumento a veces espectacular y muy rentable de las cosechas (Fernández, 1981; Gallardo-Lara, 2004).

Los avances y resultados prácticos hoy día de la cafecultura orgánica, permiten vislumbrar un futuro positivo al mercado de los productos orgánicos. Por ejemplo, son ya numerosos los ejidos en diversas regiones de Chiapas, que están incentivando el uso del abonamiento orgánico en varias regiones cafetaleras, con resultados alentadores por la demanda, sobre todo en países europeos. Se cita, además a Chiapas, como una de las regiones más importantes en producir café orgánico para el mercado internacional (Aserca, 2002).

No obstante esta importancia, Bower, (1962), hace notar que el cafeto requiere de abonos fácilmente solubles y este no es el caso con el fertilizante orgánico, porque suministran muy lentamente, los nutrimentos.

Silvein, (1960), menciona que probablemente los buenos resultados obtenidos con los abonos orgánicos se debe a que éstos son de lenta asimilabilidad y por tanto va suministrando las cantidades requeridas de N, P y K o de algunos otros elementos, según las necesidades de la planta y los periodos de absorción de las raíces durante el año. En cambio el fertilizante químico es de fácil solubilidad, pero cuando se aplica en época de inactividad radicular se pierde en gran parte por lixiviación antes de ser utilizado.

Avilés, (1964), corroborado por Machado, (1968), reportan que el efecto de los abonos minerales es inmediato y dura aproximadamente un año. Sin embargo, los orgánicos son más lentos pero duran varios años (posiblemente 4 ó 5). El efecto prolongado de los nutrimentos se debe en parte a la lenta asimilabilidad de ciertos nutrimentos contenidos en el estiércol o compost, en parte al hecho de que una porción de la materia orgánica puede durar por varios años y ayudar al incremento de los nutrimentos solubles presentes en el suelo, y por otra parte, por promover la actividad de la mayor cantidad de raíces de los cultivos.

Carvajal, (1984), en la revisión que realiza sobre trabajos efectuados de abonos orgánicos, señala que son de gran valor cuando se cuenta con los materiales a discreción o bien cuando se pueden adquirir a bajo costo y que su empleo en los cafetales es particularmente ventajoso en suelos erodados y poco fértiles, mientras que en los suelos fértiles se observa poca respuesta del cafeto a la aplicación de materia orgánica, asimismo, que en experimentos conducidos en Kenya y Brasil, han resultado satisfactorios cuando se complementan con fertilizantes y que en suelos deficientes en K, la pulpa puede sustituir al estiércol.

Otro aspecto importante que señala éste autor con respecto a los abonos orgánicos, es que es indispensable observar el mantenimiento adecuado de la relación C/N, ya que a pesar de las ventajas que representan éstos, su uso pueden inducir una fuerte deficiencia de N cuando la relación C/N es alta y el material es pobre en N (Gallado *et al.*, 1988; Monge, 1999; Hirzel, *et al.*, 2004).

Por lo que se refiere a la pulpa de café (también llamada broza) como abono orgánico, Sylvain, citado por Carvajal, (1984), ha estimado que el N es tres veces más alto que en el abono orgánico de establo, así mismo, este último autor señala que el contenido de P, aún cuando varía según la fuente de información, el promedio no parece ser más alto. La composición química de la pulpa de café se muestra abajo (fig. 17). Una tonelada de pulpa tal como se obtiene en la separación de los “despulpadores” durante el “beneficiado”, contiene las siguientes cantidades de N, P y K: N: 3.7 kg; P₂O₅ 0.88 kg; K₂O 7.02 kg.

Cuadro 17. Composición química de la pulpa de café (% en base seca)

Clase de material	N	P	K	Ca	Mg	S	Referencia
Pulpa de café	1.56	0.16	2.43	0.45	0.07	0.11	Carvajal, (1959, 1984).
Pulpa de café	1.74	0.10	5.26	0.48	0.11	0.13	Mehlich, (1966), cit. por Carvajal, (1984).

El valor de la pulpa como abono orgánico reside en la cantidad alta de materia orgánica que contiene (arriba de un 99%). Sylvain, (1960), citado por Carvajal, (1984), señala que resultados de investigación favorece su uso como abono, estimándose aplicaciones de 5 a 10 kg/arbusto.

En la zona cafetalera de Colombia, en experimentos conducidos por Uribe *et al.*, (1983), para evaluar en términos de producción el efecto de la pulpa de café como fertilizante para el cafeto en comparación con el fertilizante químico, encontraron aumentos apreciables en producción, en relación con el testigo sin fertilizar. Encontró que las aplicaciones superficiales de 12 y 6 kgs de pulpa descompuesta tuvieron producciones similares a las aplicaciones de fertilizante químico, aunque en algunas ocasiones la aplicación de 12 kgs de pulpa fue superior a la del fertilizante y en otras la aplicación de 6

kgs fue inferior a la del fertilizante. No obstante estos resultados favorables para usarlo como sustituto del fertilizante químico, también señalan que el poder residual de la pulpa es relativamente corta y que es preciso aplicarla en forma continua todos los años para conservar su efectividad como fertilizante para café.

Los cafés orgánicos son aquellos en cuya producción y procesamiento no se ha utilizado ninguna clase de insumo químico. La producción mundial de café orgánica es reciente y restringida. Iniciada en 1991, alcanza apenas un total de 6.668 toneladas, proviniendo la mitad de México, que fue el país pionero en la producción de este tipo de café. El otro 50% de la producción mundial procede de Guatemala, Brasil, Perú, Costa Rica y República Dominicana (Aserca, 2002.)

2.3.6.3 Fertilidad de suelos y el cultivo del cafeto

La fertilidad de los suelos donde se produce una alta o baja producción de café fue estudiada inicialmente en Kenya, (Mehelich, cit por Carvajal, 1984), donde se encontró que todas las propiedades químicas (excepto el pH) resultan mas bajas en los suelos de baja producción (cuadro 18). En Costa Rica, los ensayos con plantas indicadoras han señalado la existencia de tres categorías de fertilidad de suelo bien definidas (Carvajal, 1984).

Cuadro 18. Propiedades químicas de suelos cafetaleros de alta y baja fertilidad

Propiedades química		Suelo	
		Alta fertilidad	Baja fertilidad
pH		6.5	5.7
K ⁺	me/100 g	1.9	0.8
Ca ⁺²	me/100 g	7.1	1.3
Mg ⁺²	me/100 g	4.1	1.1
Na ⁺	me/100 g	0.6	0.4
Mn ⁺²	me/100 g	1.5	0.7
P	ppm	20.0	4.0
Ca/Mg	(cociente)	1.7	1.2
Ca/K	(cociente)	3.7	1.6
Mg/K	(cociente)	2.2	1.4

Fuente: Mehelich, cit por Carvajal, (1984).

Carvajal, (1984), también señala que la fertilidad de los suelos cafetaleros se valora mediante los niveles críticos de los elementos en el suelo, pero fundamentalmente por los equilibrios Ca+Mg/K; Mg/K; Ca/Mg; Ca/K; K/S y K/T.

En cuanto al P, en Kenya, se considera que un contenido >30 ppm debe ser interpretado como alto, medio entre 15 y 30 ppm y bajo <15 ppm. En Colombia se estima

que los suelos que contienen <25 ppm (extraído con H₂SO₄ 0.08N) responden a P (Coste, 1978; Carvajal, 1984).

En el cuadro 19 se muestran las concentraciones altas, medias y bajas de P considerados por tres países cafetaleros: Costa Rica, Colombia y Kenia (Carvajal, 1984).

Cuadro 19. Concentraciones bajas, medias y altas de P para algunos suelos de varios países cafetaleros

Elemento	Contenido en el suelo			País
P (ppm)	Bajo <15	Medio 15-30	Alto >30	Kenya (Mehlich, 1968)
	<10	10-30	>40	Costa Rica (Ramírez, 1980)
	<25	-	-	Colombia (López, 1969)

Fuente: Carvajal, (1984)

Es evidente que una producción anual del orden de 2 a 3 toneladas por hectárea con una alternancia poco marcada, exige considerables recursos nutritivos, muy superiores a los que puede suministrar el suelo más rico. El aporte de dosis elevadas de fertilizantes y abonos orgánicos, es pues, para este material vegetal, absolutamente indispensable. Toda insuficiencia puede causar gravemente un rápido debilitamiento de los arbustos (Malavolta, 1981; Bravo, 1984; Carvajal, 1984).

Aunque en algunas regiones cafetaleras, se hace, con buen éxito, un uso extensivo del análisis del suelo como medio para determinar su estado de fertilidad, se hace necesario conocer la correlación que existe entre la disponibilidad de los elementos en el suelo, y la utilización de éstos por la planta mediante el análisis foliar (Amorin, 1973; Bravo, 1984; Noriega *et al.*, 1986; Valencia, 1998, 1999).

El análisis foliar para la correlación suelo-planta, es muy útil porque permite conocer la cantidad de nutrimentos que se encuentran presentes en un cafeto, y muestra si existe o no deficiencia de algún elemento en la planta. La desventaja que tiene es la de que no indica cuál es la mejor forma de corregir la deficiencia. Así por ejemplo, si se comprueba una carencia de Fe por medio del diagnóstico foliar, y se aplica este elemento al suelo, quizás no se tenga un resultado positivo de mejoramiento, ya que puede tratarse de un suelo calcáreo, o de uno con alto contenido de P soluble, dando por resultado la insolubilidad inmediata del Fe agregado (Valencia, 1984; Snoeck, 1984; Noriega *et al.*, 1986).

Se han hecho recomendaciones para el abonamiento y fertilización del cafeto basada en resultados del análisis del grano. Sin embargo, aunque se conozca la cantidad de nutrimentos extraídos del suelo por una cosecha de café, al aplicar fertilizantes, se debe considerar también la cantidad de nutrimentos presentes en el suelo, pues de otro modo se harían innecesarios y hasta se podría producir una toxicidad por la acumulación de un elemento (Carvajal, 1984; Ramírez *et al.*, 1999).

El diagnóstico foliar es importante en el descubrimiento de una deficiencia incipiente que puede ser muy perjudicial. En tales casos la insuficiencia no se nota fácilmente a no ser por el descenso de la productividad. Solamente cuando un elemento se encuentra en el suelo en una concentración muy baja, hay deficiencia fuerte y se presentan síntomas visuales de la nutrición defectuosa en la forma de hojas de tamaño reducido o deformada, clorosis, muerte regresiva (*die-back*) de la rama, crecimiento raquítrico, cosecha escasa o del todo inexistente (Lott *et al.*, 1956; Chebadi, 1970; Parra, 1972; Carvajal, 1984; Valencia, 1984).

Muchos de los daños que se llegan a producirse por tal estado son muchas veces imposibles de remediar. Afortunadamente debido a la variabilidad que siempre presenta el suelo, algunas de las plantas muestran estos síntomas más pronto y en forma más acentuada, permitiendo su control oportunamente. (Noriega *et al.*, 1986; NCRS, 2000).

Para la identificación de los síntomas de una nutrición defectuosa se procura producir las deficiencias cultivando cafetos en soluciones nutritivas que carecen de los elementos en estudio. Casi siempre se usan arbolitos muy jóvenes que no han alcanzado edad de producción, puestos en un medio de composición química relativamente simple, lo que da por resultado que los efectos obtenidos no coincidan siempre con los que aparecen en el campo cuando escasea el mismo elemento. (Snoeck, 1984; Valencia, 1984; Ramírez *et al.*, 1999).

En el cafeto, por lo general se acepta, especialmente en el análisis químico comparativo de experimentos con fertilizantes, el uso del cuarto par de hojas (en ocasiones las terceras), contando del ápice de la rama, para los fines analíticos (fig. 34). Dichas hojas han completado su crecimiento y no muestran cambios rápidos en el contenido de nutrimentos. Cuando se efectúa el análisis foliar para identificar una deficiencia mineral es necesario tomar también hojas más jóvenes o más viejas. En el caso de la deficiencia de K o de Mg, por ejemplo, las hojas más viejas (especialmente las del crecimiento del año anterior en la parte productora de la rama) se afectan primeramente, en parte por el fácil traslado de estos elementos a las hojas más jóvenes o a los frutos (Valencia, 1968; Chebadi *et al.* 1970; Haarer, 1977; Coste, 1978; Jiménez, 1980; NCRS, 2000).

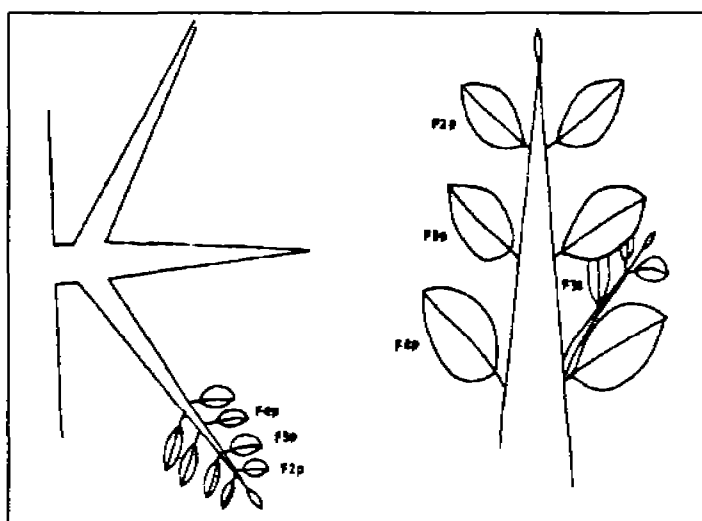


Figura 34. Diagrama de la posición sobre las ramas de hojas de café para los estudios foliares. Fuente: Jiménez (1980)

Aún cuando ocurra una fuerte pérdida de las hojas viejas a causa de la carencia de K o de Mg, las hojas jóvenes pueden mantener un nivel relativamente alto de estos nutrimentos. Por lo tanto solamente el análisis de las hojas viejas revela el verdadero estado de nutrición del cafeto con respecto a estos elementos. En el caso de deficiencias que afecten los crecimientos jóvenes es necesario analizar las hojas tiernas para verificar si la carencia de un elemento tal como el B, es la responsable de los síntomas (Valencia, 1968, 1984).

La comparación de datos analíticos de hojas afectadas (deficientes) y de hojas sanas de la misma edad y provenientes de igual posición en el árbol, es muy útil para determinar el origen de una deficiencia (Carvajal, 1963; Chebadi, 1970; Hiroce, 1981; Noriega *et al.*, 1986).

Para una mejor comprobación del estado nutritivo de un cafeto o de un cafetal, con respecto a los elementos N, P, K y Mg, se recomienda comparar los resultados del análisis del cuarto par de hojas con las hojas adultas del crecimiento de año anterior, en las mismas ramas que tengan frutos. Si un elemento está relativamente muy bajo en las hojas viejas, es probable que exista deficiencia (Valencia, 1968; Jiménez, 1980; Bravo, 1984; Chebadi *et al.*, 1970).

Generalmente se distinguen cuatro concentraciones o niveles de nutrimentos en las hojas. El nivel "normal" representa la concentración promedio y es suficiente para producir una cosecha abundante. Si la concentración de un elemento es mayor, existe un exceso o "consumo de lujo". Si el contenido es menor que el nivel normal es probable que se afecten el crecimiento y especialmente la productividad, el elemento es "deficiente". Cuando existe una deficiencia severa la concentración del nutrimento baja más allá del nivel "crítico", aparecen síntomas visuales de la nutrición defectuosa (clorosis, crecimiento raquítico, etc.) (Chebadi, 1970; Carvajal, 1972, 1984; Hiroce, 1981; Valencia, 1984).

De acuerdo a estos autores, el contenido normal sirve como base de comparación en el diagnóstico foliar. Señalan también que se debe considerar que este nivel es variable, ya que el suelo, el clima, los métodos de cultivo y una cosecha abundante tienen un efecto importante sobre el contenido de los nutrimentos en el café. Por ejemplo, el nivel de N es más bajo en lugares con sombra que en lugares a pleno sol. En un área con las lluvias distribuidas uniformemente durante todo el año, el contenido de los elementos en las hojas no muestra mucha variación durante el curso del año. Pero si hay una estación seca alternando con una lluviosa, el nivel de los nutrimentos varía de acuerdo con estos cambios.

Tomando muestras frecuentes durante el año, se puede establecer tal curva de variación la cual puede servir como base para determinar las épocas más adecuadas para la aplicación del abono (Valencia, 1984).

Con respecto a la deficiencia de P, de acuerdo con Ramos, (1982, 1984), una gran proporción de la superficie de la zona de Soconusco, corresponde a suelos ácidos y derivados de cenizas volcánicas, las cuales son en su mayor parte deficientes en P aprovechable para las plantas, ocasionando la fijación de grandes cantidades de este elemento cuando se aplica como fertilizante. Esto determina que en tales suelos el P sea un factor limitante para el crecimiento normal y producción de plantas cultivadas comercialmente. En los experimentos de invernadero que esta autora llevó a cabo, usando suelos Andisólicos de la región de Soconusco, y *Lactuca sativa* como planta indicadora de deficiencias de P, mediante el análisis foliar y en suelos, demostró la heterogénea respuesta a las fertilizaciones fosfóricas, indicando que la falta de éste elemento determinó que el cultivo no prosperara, mientras que en las macetas que recibieron tratamientos con suficiente P, las plantas presentaron un desarrollo vigoroso.

En la mayoría de los casos, cuando no se aplica P, la producción de los cultivos anuales es extremadamente baja y no es posible lograr beneficios apreciables con el uso de variedades mejoradas (Guridi, 1985; Alfaro *et al.*, 1998).

2.3.7 LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS Y ROCA FOSFÓRICA EN SUELOS DE ANDO

2.3.7.1 Los fertilizantes fosfatados

La concentración de P en los fertilizantes se ha expresado históricamente como el pentóxido de fósforo (P_2O_5) equivalente. En el cuadro 20, se muestra la composición nutrimental de algunos fertilizantes fosfatados.

Cuadro 20. Composición de algunos materiales fertilizantes fosfatados

Material	N	P	K	Ca	Mg	S	P disponible
	Porcentaje						Porcentaje total
Fosfato de amonio							
a)DAP-Difosfato de amonio	18	20					100
b)MAP-Monofosfato de amonio	15	26					100
c)APP-Fosfato de amonio	11	21					100
Fosfato-sulfato de amonio	16	8				14	100
Escoria básica (Thomas)		4 - 8		32	3	0.2	62- 94
Fosfato dicálcico		23		29			98
Fosfato de amonio magnesio	8	17		14			
Roca fosfatada cruda		11-17		33-36			14-65
Superfosfato (ordinario)		7-9		18-21		10-12	97-100
Superfosfato (concentrado)		19-23		12-24		0 - 1	96-99

Fuente: Pritchertt, (1986).

Como consecuencia de la dificultad de evaluar la disponibilidad en general del P para las plantas en los materiales fertilizantes, la solubilidad del elemento, según se determina con diversas soluciones extractivas que se utilizan ampliamente como una medida de su disponibilidad para las plantas. La fracción del P fertilizante extraíble en el agua se expresa como porcentaje por peso del material total y se llama *fósforo soluble en agua*. Los ortofosfatos de amonio son 100 por ciento solubles en agua, en tanto que los superfosfatos son entre 90 y 98 por ciento solubles en agua. El P disuelto en una solución normal de citrato de amonio, después de la eliminación de la fracción soluble en agua, se llama fracción soluble en citrato. Algunos materiales conocidos que son en gran media insolubles en el agua, pero solubles en citrato, son los fosfatos di y tricálcicos y la escoria básica. (Pritchertt, 1986).

El *fósforo disponible* es la suma de las fracciones solubles en agua y citrato, en tanto que el P disponible más la fracción insoluble en citratos representa la cantidad total del P presente (cuadro 20). Por lo general, el fosfato coloidal y de roca se han considerado

en gran medida como materiales insolubles en citrato; sin embargo, difieren de manera un tanto amplia en cuanto a solubilidad en citrato según su origen y algunos de ellos son bastante solubles (Fernández *et al.*, 2001; Doberman, 2002; FAO, 2002).

De acuerdo a Carvajal, (1984), Kenya es de los países cafeticultores, el que ha desarrollado más el empleo científico de los fertilizantes. En este país se recomienda el uso de diversas fuentes de P en función del pH del suelo y el contenido de Ca, como se observa en el cuadro 21.

Cuadro 21. Condiciones de uso y aplicación de P en Kenya

Reacción del suelo	Suelo ácido	Suelo moderadamente ácido	Suelo ligeramente ácido
Fuentes y formas de P	Escorias básicas*	Superfosfato simple* y doble**	Fosfato diamónico** Superfosfato doble**

*Escorias y SFS=350g/arbusto

** SFD y DAP=150 g/arbusto

Technical Circular No. 38. 1978. cit. Carvajal, (1984).

En Costa Rica, Carvajal, (1978 y 1984) y Moraes, (1979) en Brasil, con el empleo de fuentes de P señalan que en suelos pobres, deficientes en el contenido de cationes, el fosfato di cálcico induce la mejor producción de biomasa, tal como se aprecia en el cuadro 22.

Cuadro 22. Respuesta a fuentes de P por cafetos cultivados en suelos de "Cerrado" Brasil, en experimentos en macetas

Fuentes de P*	Parámetros evaluados en las hojas			
	Peso seco X/maceta (g)	Contenido de P (%)	Fosfato acumulado (mg)	Porcentaje relativo Y=100
Sin P	5.5	0.0088	4.84	100
Fosfato de Patos	8.6	0.092	7.55	156
Fosfato de Catalao	11.6	0.081	9.50	210
Fosfato monoamónico	12.0	0.122	13.90	218
Hiperfosfato	12.4	0.125	15.38	225
Fosfato de Araxá	14.0	0.098	13.54	255
Termofosfato	19.1	0.089	17.00	37
Superfosfato simple	19.7	0.117	22.88	358
Fospal(Senegal)	20.3	0.112	22.72	369

*El P se aplicó a razón de 100 kg de P₂O₅/ha.
Carvajal, (1978 y 1984)

2.3.7.2 Los superfosfatos

Los *superfosfatos* han sido el grupo más importante de fertilizantes fosfatados por primera vez desde que el superfosfato ordinario (7 a 9% de P) se puso a la venta en 1843. El superfosfato ordinario, un ortofosfato de calcio se produce por reacción del ácido sulfúrico con roca fosfatada molida. Su P es aproximadamente un 90% soluble en agua y contiene aproximadamente del 20 al 12% de azufre como sulfato de calcio. Su reacción con los componentes del suelo es similar a la de otros ortofosfatos solubles en agua, pero no se utiliza mucho (Pritchertt, 1986; FAO, 2002).

El superfosfostato concentrado contiene del 19 al 21% de P y se forma tratando la roca fosfatada molida con ácido fosfórico. A causa de su solubilidad, su análisis alto y buenas propiedades físicas, se utiliza ampliamente en suelos deficientes en P, donde no se requiere N y la capacidad fijadora de P del suelo no es extrema (Moraes, 1979; Smith, 1982; FAO, 2002).

Los superfosfatos de amonio se preparan por reacción del amoniaco anhidro o acuoso con superfosfatos ordinarios o concentrados. El contenido de P del producto final disminuye en proporción al peso del amoniaco añadido, y también se reduce la solubilidad al agua del P (FAO, 2002, 2004).

Los fosfatos de amonio se producen comúnmente por reacción del amoniaco con el ácido fosfórico. Dos fosfatos muy comunes, solubles en agua, que son producidos por este proceso son el fosfato monoamónico que contiene de 21 a 25% de P con un grado fertilizante de aproximadamente 11-48-00 (N-P₂O₅-K₂O), y el fosfato diamónico (20% de P), que a menudo se vende comercialmente como grado 18-46-00. Estos fosfatos de amonio tienen la ventaja de un alto contenido en nutrientes para las plantas, buenas cualidades de manejo y proporciones de N y P adecuada para las plantas sobre suelos donde ambos elementos son deficientes (Fixen, 1994; Doberman *et al.*, 2002; FAO, 2002, 2004).

Los fertilizantes fosfatados producidos recientemente y que tienen valor en situaciones especiales son el Polifosfato de amonio, el cual es un producto de la reacción del ácido superfosfórico y amoniaco que contiene un 25 % de P con un grado de aproximadamente 15-60-00. (Pritchertt, 1986; FAO, 2002, 2004).

Finalmente, INPOFOS (Potash and Phosphate Institute), institución dedicada a promover el buen uso del P y el K en diferentes sistemas de producción de cultivos, ha documentado numerosas avances de investigaciones en campo, con aplicaciones de P sobre los principales cultivos de America, desde la disponibilidad de la producción de alimentos, la extracción de los grandes depósitos minerales de roca fosfórica, la producción de fertilizantes fosforados, las necesidades en los suelos, particularmente en suelos ácidos, dando cuenta de la importancia del P en suelos, en plantas y sobre todo en la productividad y calidad de plantas cultivadas con fines comerciales (INPOFOS, 1995).

2.3.7.3 Roca fosfórica

Los depósitos de rocas fosfatadas que existen en varias partes del mundo, son las únicas fuentes principales de P para fertilizantes. Molido hasta constituir un polvo fino, el fertilizante a menudo se utiliza sin un mayor procesamiento, pero se utiliza más comúnmente como materia prima para una variedad de compuestos fertilizantes fosfatados.

La fórmula general de la roca fosfatada es $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{COO}_3)_6(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2$, con una sustitución considerable por los carbonatos y otros aniones y cationes que se hallan entre los diversos depósitos (fig. 23). La concentración de P en la roca fosfatada o evaporita también varía según su origen geográfico, pero su promedio es aproximadamente del 13 al 17%, con concentraciones de fluorita del 3 al 4% (Pritchertt, 1986; FAO, 2002).

La presencia de fluorita en la roca molida influye considerablemente en la disponibilidad de sus componentes de P. Las rocas molidas fosfatadas son esencialmente insolubles en agua y su solubilidad en el citrato varía desde prácticamente cero hasta un 30%. Una alta solubilidad al citrato hace que aumente la eficacia de las aplicaciones directas a los cultivos, pero no parece que haya mucha diferencia a largo plazo entre las fuentes de rocas de diversas solubilidades. La excepción posible es que las fuentes con 25 a 30% de solubilidad al citrato pueden proporcionar a las plantas una ventaja inicial de crecimiento que les ayudará a establecer una predominancia sobre vegetación competidora (Griffith, 1985; Pritchertt, 1986; Fixen, 1994).

La roca mineral fosfatada no ha tenido muy buena aceptación entre los agricultores, ya que su P no está en proporción suficientemente disponible para los cultivos anuales. Pero esta roca mineral tiene su máximo potencial como fuente de P para la fertilización sobre suelos ácidos. Los ácidos orgánicos de estos suelos disuelven lentamente el P de la roca mineral haciéndolo especialmente adecuado para suelos con capacidades muy altas para la fijación de P. Los suelos arcillosos que contienen grandes cantidades de Fe y Al activos en sus horizontes superficiales y los fosfatos solubles en agua que se aplican a estos suelos gradualmente se convierten en productos de precipitación relativamente no disponible. En consecuencia, las fuentes relativamente insolubles deberían utilizarse sobre suelos de una muy alta capacidad fijadora de P (Moraes, 1979; Alegre, 1991; Herrera *et al.*, 1994).

La efectividad de los fertilizantes de fosfato de diversas solubilidades está también estrechamente relacionada con el tamaño de las partículas de los fertilizantes. El porcentaje de recuperación acorto plazo de fosfatos altamente solubles generalmente aumenta en proporción directa con el tamaño del gránulo ó en proporción inversa al contacto con el suelo. En respuesta a los fosfatos apenas soluble, como el fosfato de roca mineral, aumenta a medida que se reduce el tamaño de partícula. Los fosfatos solubles en agua deberían reservarse para los suelos que tengan capacidades moderadas para la retención del P en sus horizontes superficiales (Rojas *et al.*, 1991; Montenegro *et al.*, 2002).

La principal desventaja de la roca fosfórica es que su composición general y su contenido de P (P_2O_5) varían con los diferentes yacimientos (Rojas *et al.*, 1991; Solórzano, 1991).

La roca fosfórica aparte de contener un 30 a 36% de P_2O_5 , de un 40% a 48.30 de CaO, de 0.5 a un 2.0 de Fe, un 3.78 de F y SiO_2 , (cuadro 23) contiene cantidades variables de carbonatos, sulfatos, Mn y Al. Parece que es infundada la creencia de que el contenido de flúor de la roca fosfórica es potencialmente peligrosa. Numerosas investigaciones en diversos países han revelado que el F no es fácilmente absorbido y que, de hecho, no se ha sabido de efectos perniciosos consecuentes a la aplicación de fosfatos que contienen F. El mayor contenido de F encontrado en ciertos cultivos forrajeros fertilizados durante varios años con fosfatos, fue de 2 mg/kg (Pritchertt, 1986; FAO, 2004).

Cuadro 23. Diagrama mostrando el análisis aproximado de una muestra de roca fosfórica

Componente principal	Total	Calcita	Dolomita	Pirita	Sílice
CaO	48.30	0.94	0.25		
P_2O_5	30.42				
F	3.78				
Cl	0.00				
SiO_2	1.79				1.72
Al_2O_3	0.38				
Fe_2O_3	0.53			0.53	
Na_2O	0.90				
K_2O	0.10				
MnO	0.00				
MgO	0.47		0.06		
CO_2	5.83	0.74	0.26		
S	1.10			0.43	
Total	93.61	1.68	0.57	0.96	1.72

Fuente: FAO, (2004)

La roca fosfatada sólida vale solamente la mitad de lo que cuesta el superfosfato y aquélla contiene casi dos veces más de P (como P_2O_4) que éste. Con frecuencia se mencionan estos hechos para demostrar que la roca fosfatada es más económica que el superfosfato (Etchevers *et al.*, 1986; Alegre, 1991).

Explorando la importancia de la roca fosfórica sobre la problemática del P en suelos andisólicos, en el estudio de Etchevers *et al.*, (1986), llevaron a cabo una amplia recopilación de resultados de por lo menos veinticinco investigaciones sobre la utilización de la roca fosfórica en México. Dicho estudio muestra la composición química de las rocas fosfóricas de diferentes yacimientos del norte del país, comparadas con rocas fosfóricas de

Florida y Marruecos, su aplicación agronómica, evaluados sobre cultivos de maíz, yuca, frijol, forrajes y pastos, especialmente en suelos de ando de la Sierra Tarasca, Michoacán, del Estado de México, de Veracruz, y en suelos ácidos de Tabasco. Estos autores compararon el P sobre la producción de estos cultivos, también valoraron la acidulación de la roca fosfórica, paralelamente se compararon otras fuentes de P como el superfosfato triple y los abonos orgánicos. Los investigadores, encontraron respuesta positiva a la aplicación de roca fosfórica como fertilizante fosfatado en comparación al rendimiento de parcelas testigo sin P. Sin embargo, señalan que los rendimientos con dosis equivalentes de superfosfato simple o triple eran mayores, y las mejores respuestas fueron los obtenidos en suelos ácidos y suelos de ando.

Señalan también estos autores que aunque el efecto de la roca fosfórica era menor en ciertos experimentos comparado con el superfosfato, su efecto era mayor que el testigo y que el efecto residual era, en general, mayor para las aplicaciones con roca fosfórica que con superfosfato triple y que el aprovechamiento del P de las rocas fosfórica por su lenta liberación es benéfico para suelos ácidos volcánicos, pero los fertilizantes de alta solubilidad fueron más eficientes.

Muchos autores (Carvajal, 1984; Guridi *et al.*, 1985; Fixen, 1994; Rivero *et al.*, 2001; FAO, 2002), están de acuerdo en que los suelos altamente fijadores de P, con el uso de la roca fosfórica hay un aumento en la absorción de P y en particular en los suelos volcánicos ácidos, por el carácter residual y que puede ser aprovechado en cultivos perennes, pero para cultivos anuales dada la necesidad de obtener disponibilidad inmediata del P, es necesario la utilización de fertilizantes solubles.

2.3.7.4 Manejo del P.

La deficiencia del P es uno de los factores limitantes edáficos más difundidos en América tropical. En la figura 35, se muestra la dinámica de la fijación de los fertilizantes fosfatados en suelos ácidos, ligeramente ácidos y alcalinos. En la realidad el problema es muy complejo, pero en suelos ácidos es donde el problema se acentúa. Sánchez, *et al.*, (1983), citan en un amplio estudio sobre el P que aproximadamente un 82% de la extensión de tierras del trópico americano, presenta deficiencias de P en su estado natural. En sabanas y bosques húmedos de Oxisoles y Ultisoles, el estimativo aumenta al 96% del área (Sánchez y Cochrane, 1980, cit por Sánchez, 1983). Según éstos autores los suelos con una alta capacidad de fijación de P se pueden definir como aquellos que requieren adiciones de por lo menos 200 kg de P/ha con el fin de proporcionar una concentración de equilibrio de 0.2 ppm de P en la solución del suelo

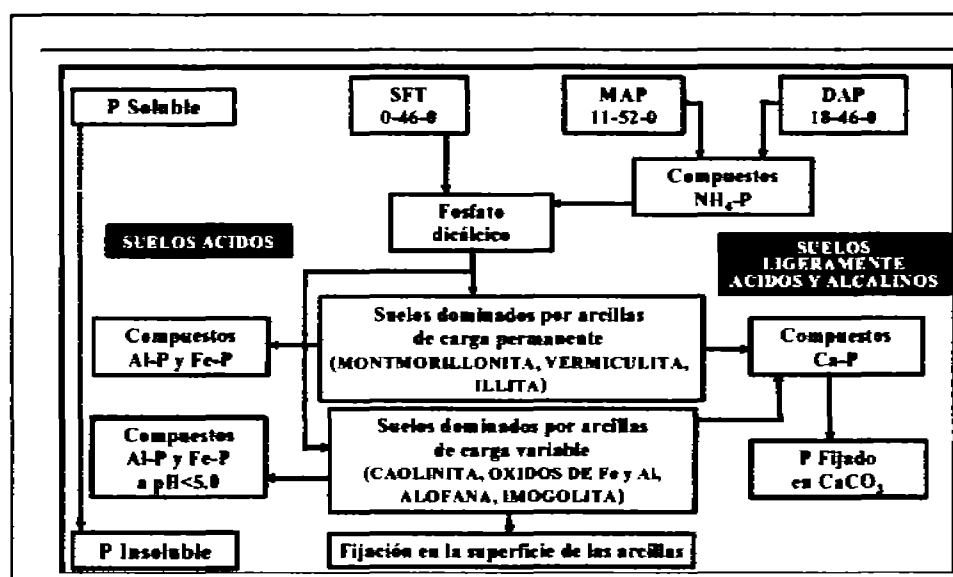


Figura 35. Dinámica de los fertilizantes fosfatados en el suelo.
Fuente: Fixen, (1992).

Los suelos ácidos que fijan tales cantidades de P se pueden identificar como aquellos con texturas francas o arcillosas en su capa superficial con una relación de sesquióxidos/arcillas de 0.2 ó más, o por la dominancia de alofano en la fracción de arcillas de la capa superficial (Sánchez *et al.*, 1983). Aproximadamente un 53% de extensión de tierra de América tropical está dominado por suelos con una alta capacidad de fijación de P como la descrita. En las regiones de Oxisoles-Ultisoles esta cifra aumenta al 72%, pero esta cifra aumenta con suelos de alta capacidad de fijación de P como los suelos volcánicos, denominados Andisoles en la clasificación Americana USDA (Cochrane y Sánchez, 1981; ICOMAND, 1986; ISSS, ISRIC y FAO, 1994; Sharpley, 1996; Atia *et al.*, 2002).

Diversos autores como Sánchez y Uehara, (1980), Sánchez *et al.*, (1983), señalaron que entre los Oxisoles y Ultisoles, la fijación de P generalmente aumenta con el contenido de arcillas debido a su relación directa con el área superficial en donde se localizan los óxidos e hidróxidos de Fe y Al y que son los responsables en gran parte de la fijación de P.

El costo unitario relativamente alto de fertilizantes fosforados junto con la ampliamente difundida deficiencia y fijación de P, exige que para estos suelos se desarrollen tecnologías de bajos insumos que puedan hacer un uso más eficiente del P aplicado. En la revisión que hace Sánchez y Salinas, (1983), exponen que varios autores sugieren estrategias con el fin de desarrollar sistemas de manejo apropiados para el P en cultivos y pasturas de los suelos ácidos e infértiles de América Tropical. La estrategia consta de seis componentes principales, cinco de los cuales se encuentran relativamente bien establecidos:

- 1) la determinación de la combinación más apropiada de métodos y dosis de aplicación para estimular los efectos iniciales y residuales;
- 2) el mejoramiento de los procedimientos de evaluación de la fertilidad del suelo para hacer recomendaciones de aplicación de P;
- 3) el uso de fuentes de P menos costosas, tales como las rocas fosfóricas, ya sea solas o en combinación con superfosfatos;
- 4) el uso de cantidades moderadas de cal para aumentar la disponibilidad de fuentes solubles de P;
- 5) la selección de especies y variedades que puedan crecer bien en condiciones de niveles menores de P aprovechables en el suelo, y
- 6) la exploración de las posibilidades prácticas de las asociaciones de micorrizas para aumentar la absorción de P de las plantas.

2.3.8 EL RETO DE LA SUSTENTABILIDAD EN EL AGROECOSISTEMA CAFETALERO DE MÉXICO

En el contexto del Desarrollo Sustentable, hoy está claro que la relación de los sistemas ecológicos y los agroecosistemas tienen un gran impacto en las economías y la sociedad. Por tanto, están estrechamente interrelacionados: ignorar uno de los ejes significa inevitablemente poner en peligro al otro.

Específicamente en la agricultura, los suelos volcánicos han sido muy valiosos para la producción de los cultivos, e influyen directamente en la economía de estas regiones. Los asentamientos humanos en todas las regiones de nuestro país, desde los templados hasta los tropicales, se han establecido preferentemente en regiones volcánicas, dando un uso intensivo a éstos suelos. Por tanto, se hacen urgentes planes que propicien la conservación y/o mantenimiento de la fertilidad de éstos y frenar los procesos de degradación en curso, si se quiere hacer algo por el futuro de las próximas generaciones.

Los recursos naturales de las zonas volcánicas son imprescindibles para el ser humano ya que depende de ellas para las actividades conexas, y son indiscutiblemente: los suelos, el agua, el aire y las plantas. El uso, manejo y conservación adecuado de estos recursos, en las actividades económicas y sociales, constituye la base del Desarrollo Sustentable, el cual incorpora, no solamente la satisfacción de las necesidades básicas para el hombre en el presente, sino su conocimiento, mantenimiento, restauración y cuidado de los principales recursos para un uso y desarrollo de generaciones futuras.

2.3.8.1 El café en el mundo

El café es después del petróleo, el producto más importante de exportación, además se le clasifica como de producción global por estar limitada a las zonas tropicales y subtropicales.

Los países con mayor consumo de café son: Norte América, Europa y Japón. En el 2001 los países productores exportaron 90,297,363 sacos de café, siendo los de mayor producción Brasil, Vietnam y Colombia. Según datos de la Organización Internacional del Café (OIC, 2003), México se encuentra situado en el lugar 8° de los países productores (fig. 36).

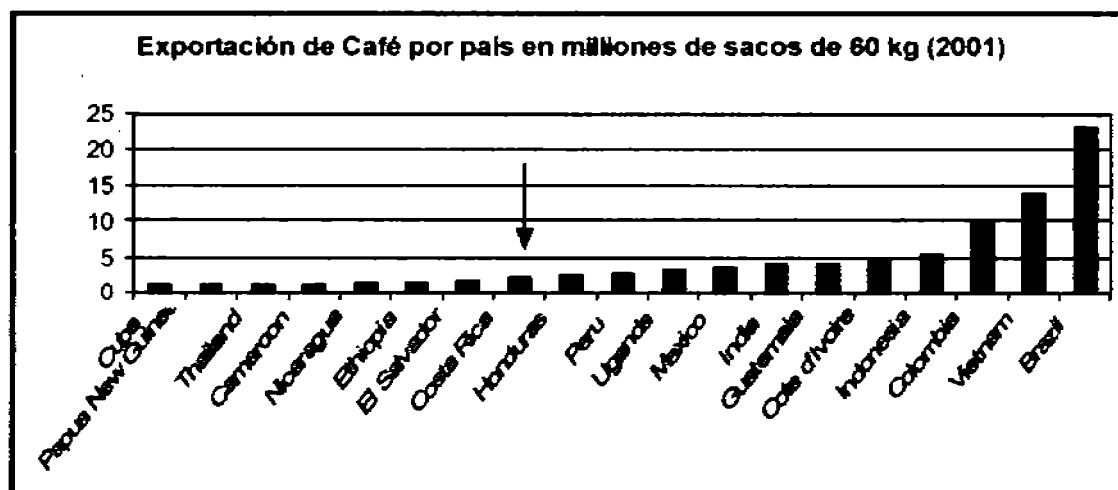


Figura 36. Exportación de café por país productor. Fuente: OIC, (2003)

Aunque los precios del café históricamente han sido altamente volátiles, con la entrada de nuevos productores al mercado, Vietnam principalmente, contribuyeron a generar una sobreoferta, detonando así una nueva crisis del mercado del café al inicio del nuevo milenio. Esto ha producido que el balance de oferta y demanda en el mercado mundial del café acuse un severo desajuste, originando un desplome de los precios internacionales al nivel más bajo de los últimos 50 años (CEPAL-ONU, 2002).

Este colapso de los precios del café, originado por la fuerte competencia de los países altamente mecanizados como Brasil y los salarios extremadamente bajos como en Vietnam ha precipitado al sector cafetalero en países de América Central y México a una profunda crisis (Covarrubias *et al.*, 2005).

En el 2001 hubo una sobreoferta de unos 10 millones de sacos, lo cual, provocó que el precio promedio se mantuviera por debajo de \$50 dólares por quintal, el más bajo en más de 50 años (Covarrubias *et al.*, 2005) (fig. 37).

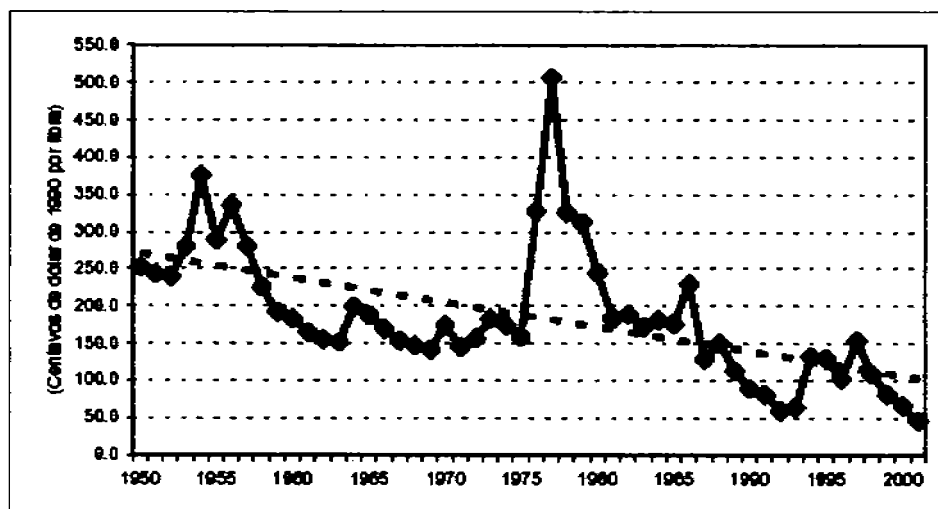


Figura 37. Precios del café (otros suaves): mercado internacional (precios promedio en dólares de 1990). Fuente: CEPAL-ONU, (2002)

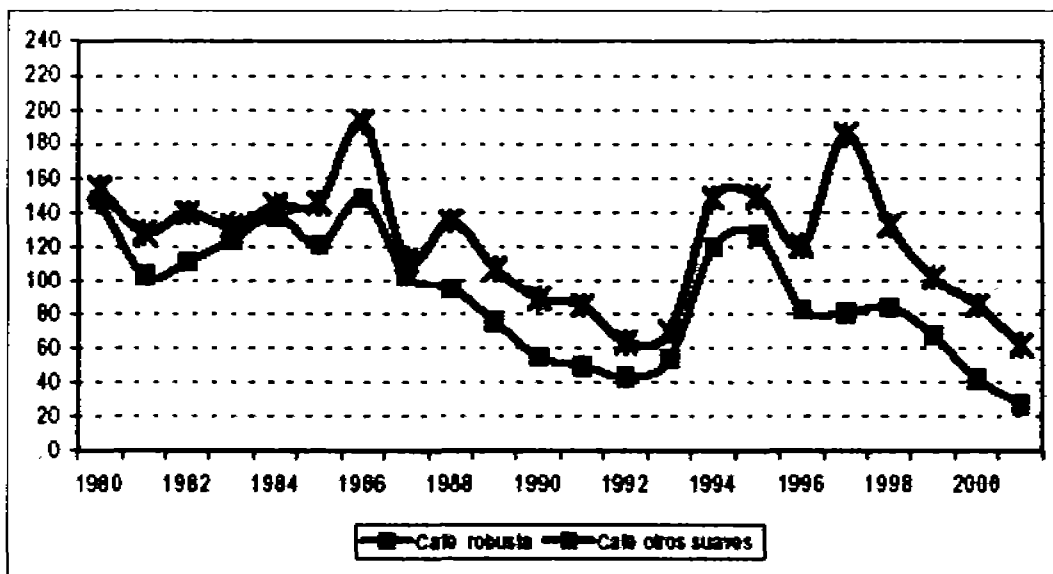


Figura 38. Precios del café en el mercado de Nueva York (Dólar/libra).
Fuente: CEPAL-ONU, (2002)

Es importante agregar también que debido a la estructura comercial de la industria del ramo cafetero en muchos países importadores, en especial en los Estados Unidos, la caída de los precios internacionales del aromático, (figs. 38 y 39), no se reflejó en el nivel del consumidor final, lo que contribuyó al virtual estancamiento del consumo de café (103 millones de sacos). CEPAL.

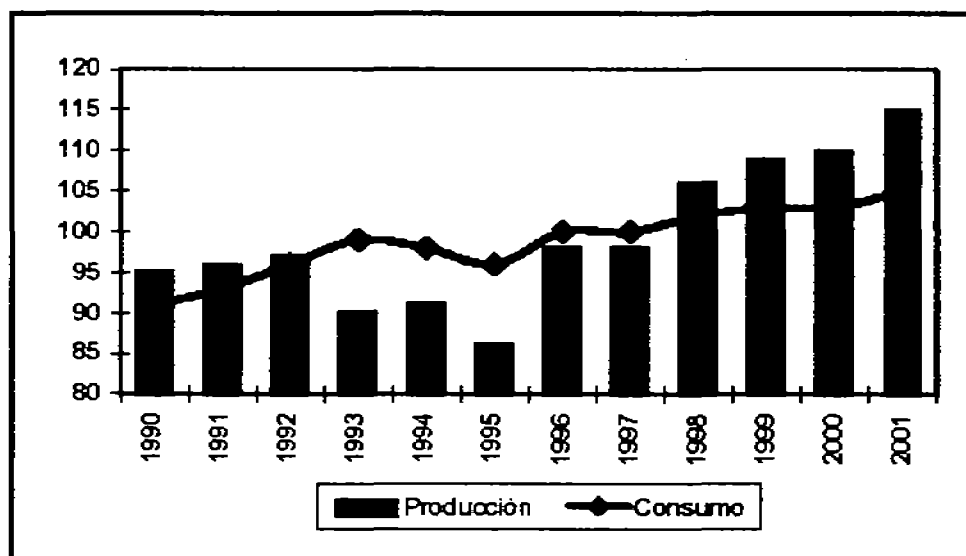


Figura 39. Producción y consumo mundial de café (Millones de sacos de 60 kg). Fuente: CEPAL-ONU, (2002).

2.3.8.2 El café en México

Según la OIC, 2003, México ocupa el octavo lugar a nivel mundial como productor de café, después de Brasil, Colombia, Indonesia y Vietnam (fig. 40). La variedad que produce es la arábica, conocida por ese nombre debido a su origen. El café en México es producido por cerca de 300 mil productores, agrupados en 16 organizaciones. La superficie cultivada abarca 690 mil hectáreas, en doce estados de la República Mexicana. Estos estados son Colima, Chiapas, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tabasco y Veracruz. El café se cultiva a la sombra, en armonía con el ecosistema, por lo que los cafetales mexicanos son grandes productores de oxígeno. México produce cafés de excelentes calidades, ya que su topografía, altura, climas y suelos, le permiten cultivar y producir variedades clasificadas entre las mejores del mundo. En la actualidad, México es el primer productor mundial de café orgánico (Aserca, 2002).

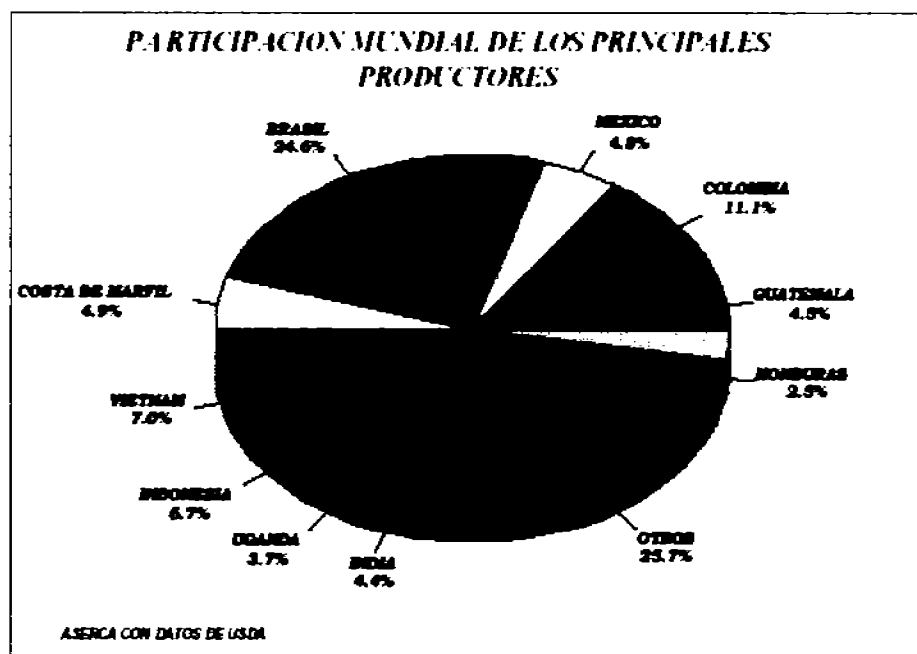


Figura 40. Distribución en la participación mundial de los principales productores. México aporta el 4.8% de la producción

Los indicadores muestran la importancia de este cultivo en nuestro país.

- La cafecultura mexicana beneficia a 3 millones de personas, principalmente en las zonas rurales del país.
- En México existen 481 mil productores de café, según el Nuevo Padrón Cafetalero
- Para la cafecultura se destinan 665 mil has en el país.
- México ocupa el séptimo lugar como productor de café.

- La producción de café en México en ciclo 2002/2003 fue de 4.2 millones de sacos de 60 kilos
- El consumo de café en México es de 750 g, per capita, anualmente.
- Las exportaciones de café de México para el ciclo 2002/2003 fueron de 2.6 millones.
- México es el principal productor de café orgánico en el mundo
- El Café de México se consume en 58 países, aunque el 80% de las exportaciones se envían a EU.
- Paradójicamente, si cada mexicano consumiera una taza de café diaria, la producción nacional no alcanzaría, con lo cual se mejoraría el precio del aromático.

2.3.8.3 El café en el Estado de Chiapas

En Chiapas, se tienen los siguientes indicadores (Anuario Estadístico del Estado de Chiapas, 1999).

- El café cultivado en el Estado de Chiapas abarca una superficie de 231,329 hectáreas, equivalentes al 30.39% de la superficie estimada a nivel nacional de 761,165 hectáreas.
- Chiapas cuenta con 72,294 productores cafetaleros, cifra equivalente al 26% del total de la población productora a nivel nacional que se dedica a esta actividad, de la cual dependen aproximadamente 450,000 chiapanecos y genera 100,000 empleos al año.
- Dichos cafeticultores están distribuidos en 1,718 comunidades de 77 municipios y nueve regiones económicas del Estado de Chiapas (Centro, Altos, Fronteriza, Frailesca, Norte, Selva, Sierra, Soconusco e Istmo-Costa), las cuales se encuentran ubicadas entre las latitudes de 15° N y 17°20' N y entre las longitudes de 91°45' O y 93°45' O.
- El Estado de Chiapas cuenta con dos regiones geográficas productoras de café: la del Soconusco y la Centro-Norte del Estado, las cuales se caracterizan por la particularidad de su precipitación pluvial principalmente (de 2,500 a 5,000 mm anuales), con una temperatura promedio anual de 18° a 25°C,
- El café se cultiva sobre diferentes alturas, dependiendo de las regiones donde se produce, pero la que ocupa un mayor porcentaje de la superficie cultivada con café en el Estado, es el café de altura, por arriba de los 800 metros sobre el nivel del mar, que corresponde aproximadamente al 75%.
- La mayoría de la producción del café de Chiapas, se caracteriza por producirse bajo sombra forestal y por tanto, está asociada a la conservación del medio ambiente y al equilibrio ecológico, permitiendo la producción de cultivos alternativos al café, sin embargo, la baja de los precios en el mercado internacional, está propiciando significativamente el cambio del uso del suelo en muchas regiones, hacia ganadería ó cultivo de maíz, por lo que ya se observa el impacto directo sobre el deterioro de los suelos, como la erosión y pérdida paulatina de la fertilidad de estos suelos.



Figuras 41 y 42. Erosión de suelos en las laderas de suelos cafetaleros en el Soconusco, Chiapas.

Por el volumen de operaciones comerciales que se generan en el Estado, este producto logra aportar una significativa fuente de divisas en apoyo directo a la economía del país y del estado.

- Se comercializa en grano verde por la vía de empresas comercializadoras sociales y privadas, quienes lo compran en las principales regiones productoras del Estado y lo distribuyen en mercados de exportación.
- Dada la excelente calidad del Café de Chiapas, éste tiene una demanda potencial tanto a nivel nacional, para su consumo interno como en el mercado internacional, hacia el cual se exporta el 80% del café producido en el Estado.

2.3.8.4 La crisis del café

En México existen aproximadamente 481,000 productores de café, 90% de los cuales posee menos de 10 hectáreas. De ellos, 180,000 son indígenas, propietarios de predios que en el 90% de los casos tienen menos de dos hectáreas. Por ello, la caída de los precios internacionales del café tiene un impacto considerable sobre el empleo y los ingresos de un amplio número de familias mexicanas, en alta proporción indígena y campesina, situadas en los estratos de menores ingresos del país. Por su cobertura geográfica, la crisis del café se extiende a 30 regiones en 12 entidades estatales. Tan sólo en dos estados, Chiapas y Veracruz, se concentran 62% de la producción total, las cuales presentan altos índices de pobreza y de emigración interna y externa (ASERCA, 2002)

La crisis del café no ha disminuido, y los ingresos de los productores continúan decreciendo, mientras que sus demandas justas de alimentos, combustible, fibra y agua, aumentan. Al mismo tiempo, el capital natural de la tierra se agota. Es usual ahora pasar por las otrora zonas productoras de café, para ver cafetales abandonados, tierras erosionadas. Para mantenerse la cafecultura se debe situar sobre bases sustentables. El deterioro de los suelos es grave, porque la mayor parte de este cultivo en Chiapas se lleva a cabo en laderas, donde hay una fuerte erosión, pérdida de fertilidad de los suelos y agotamiento de la materia orgánica, lo que está haciendo que miles de hectáreas que una vez fueron tierras fértiles, sean ahora irreversiblemente improductivas.

Miles de productores han sufrido la fuerte caída en los precios del café y muchos miles de trabajadores han perdido su empleo. Esta baja ha puesto a muchas familias en serias dificultades para atender la salud, alimentación y educación de sus hijos. Sin embargo, paralelo a esta situación, la demanda por un café orgánico y de calidad ha aumentado. Y aquí es donde las familias productoras podrían tener ciertas ventajas.

Los costos ambientales indirectos por mal manejo de las zonas cafetaleras son tan importantes como las pérdidas de la productividad del suelo. Los sedimentos y nutrimentos perdidos durante la erosión son fuente de asolvamiento y contaminación de los ríos.

Las evidencias a nivel mundial de la crisis de los agro ecosistemas cafetaleros, sugieren que las prácticas agrícolas vigentes en muchas áreas cafetaleras ya no se pueden sostener por mucho tiempo. Pero como los indicadores económicos convencionales usados en el sector agrícola no incluyen una medición del daño ambiental, tales como la erosión del suelo, la disminución de la fertilidad, el cambio climático, etc., tales evidencias son escasamente consideradas en los medios de toma de decisiones del sector económico.

2.3.8.5 La sustentabilidad/sostenibilidad en el agroecosistema cafetalero

El concepto de la sostenibilidad alcanzó en la última década una mayor importancia a partir del informe de Brundtland en 1987. El término de la sostenibilidad encontró buena recepción y se extendió en muchas disciplinas como la política, ciencia, economía y agricultura, en el Congreso Mundial de las Naciones Unidas en Río de Janeiro en el año 1992, donde los países acordaron la Agenda 21, que es un programa para el desarrollo sostenible. Desde esta fecha, organizaciones científicas del medio ambiente y no gubernamentales (ONGs) trabajan para llevar a la práctica la Agenda 21. No existe una definición general reconocida de la sostenibilidad, pero, el informe Brundtland aporta una definición de desarrollo sostenible que está mundialmente aceptada en la que se basan la mayoría de las teorías (WCED 1994, 2004) ***“Desarrollo sustentable/sostenible, es aquel desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”***

En la actualidad, la sustentabilidad de los agros ecosistemas cafetaleros, aunque ampliamente reconocidas como importante, tiene poco impacto en las políticas económicas. Ninguno de los indicadores que se emplean comúnmente la mide, no se valora adecuadamente en las reuniones, convenciones o congresos que sobre este sector se realizan.

Desarrollo sostenible, significa un proceso que cubre las necesidades de las actuales generaciones sin perjudicar las de las futuras generaciones.

Sostenibilidad entonces, no enfoca hacia una conservación del estado actual, sino apunta a modelos de desarrollo que consideran las necesidades de las futuras generaciones; es decir se requiere de fundamentos normativos diferentes que los presentes.

Sin nuevos valores de referencia, concretos, sostenibilidad es un término vacío. Sólo en el contexto de una valoración política y social refiriéndose a una perspectiva a largo plazo, el término puede tener sentido (CRI, 2003).

En el agroecosistema cafetalero, Desarrollo sostenible significa la conservación de la riqueza ecológica, la creación de solidaridad social y la promoción de la prosperidad económica en dichas regiones. . Se orienta en tres componentes claves:

- Sostenibilidad ecológica: Estabilidad ecológica, mantenimiento y protección de los recursos naturales y de la biodiversidad de esos ecosistemas.
- Sostenibilidad sociocultural: posibilidad de desplegarse mental, cultural y políticamente de manera individual y colectiva, y a la satisfacción de las necesidades no materiales.
- Sostenibilidad económica: Asegurar la existencia de todos los miembros de una sociedad, su crecimiento económico y posibilidades de desarrollo, en diversas actividades económicas.

Las tres dimensiones de la sostenibilidad agroecológica cafetalera (ecológica, sociocultural y económica) se pueden valorar individualmente; pero están en constante interrelación y los procesos en cada nivel no ocurren independientemente. Así que, cambios en un nivel afectan a los otros. Estos cambios son mutidireccionales, por eso, un mejoramiento en un nivel puede significar un decaimiento en otro. Se puede entonces sólo lograr un desarrollo sostenible si al menos, no sucede algún empeoramiento en una de las tres dimensiones.

Se trata entonces de lograr un equilibrio en los agroecosistemas cafetaleros, entre las dimensiones ecológicas, socioculturales y económicas para combinar el aprovechamiento del sistema ecológico que provee la relación suelo-café-ambiente, de una forma óptima con una producción ventajosa.

Comprendiendo lo anterior, se puede analizar la crisis y magnitud de la problemática cafetalera y el reto de la sustentabilidad. Hoy en día la problemática en el sector cafetalero es de tal magnitud que se están abandonando los cafetales, quemando, introduciendo ganadería o cultivos básicos como maíz, cuyos impactos y sus dimensiones

todavía no son medidos en lo social, ambiental y económico. Hasta ahora los gobiernos nacionales y estatales aplican parcialmente importantes subsidios de apoyo económico para los cafeticultores, éstos pueden ser socialmente valiosos, pero es un paliativo a la crisis, lo que claramente amenaza la sustentabilidad en este sector.

Para mantener estos costos bajos, el análisis económico debería ser reorientado para promover la cafeticultura sustentable, teniendo en cuenta el uso natural del recurso, y reflejar el verdadero valor de la producción y sus políticas en beneficio de la gran cantidad de población que vive de este cultivo.

Como la toma de conciencia frente a los problemas ambientales asociados a la crisis de la cafeticultura, muchos investigadores y organizaciones están batallando para definir que es "cafeticultura sustentable". Casi todas las definiciones enfatizan el mantenimiento de la productividad minimizando los impactos ambientales. Sin embargo, ninguna de estas definiciones incorpora aspectos cuantitativos, y la productividad de la base del recurso natural -fundamental a la sustentabilidad- como los suelos y el agua, aún no ha sido incorporada en definiciones de cafeticultura sustentable. La noción de sustentabilidad en los agroecosistemas cafetaleros ha sido, por lo tanto, de uso limitado para los que diseñan las políticas y los investigadores que intentan determinar los efectos de variadas políticas y tecnologías.

No obstante lo anterior, en la "cafeticultura orgánica", es donde mejor puede aplicarse la estrategia sustentable, porque tiene impactos en la mejoría económica de los cafeticultores, en el aspecto cultural, social y ambiental. Esta modalidad en el cultivo del café ofrece para el productor el atractivo de obtener un sobreprecio, que al igual que el café tradicional varía según su calidad; así, mientras que en el mercado normal los precios del café suave fueron del orden de US\$/ 66(Qq), México colocó su café orgánico en un promedio de US\$ 105/Qq. Otros países con café orgánico de mejor calidad alcanzaron precios más altos, como Colombia que vendió a US\$ 120/Qq ó Jamaica con su célebre "Blue Mountain", que recibió US\$ 160/Qq. Actualmente se considera que existen 20 países exportadores de café orgánico (Sosa *et al.*, 1996).

Retos

Sostenibilidad de la producción agropecuaria, conservación del ambiente, manejo adecuado de los recursos naturales y calidad de vida en el largo plazo, constituyen hoy, desafíos críticos que figuran tanto en las agendas estatales, nacionales como en las internacionales.

En el caso de los agroecosistemas cafetaleros, la fertilidad de los suelos volcánicos juega un papel central para la productividad y por tanto es relevante para la realización de investigaciones, ya que representa una base de la sostenibilidad, de uno de los agroecosistemas cafetaleros más importantes en los trópicos del planeta, lo que hace que ellos dependan del tiempo, de la sociedad, de la economía, de su percepción, valoración, conocimientos y necesidades.

En la actualidad, es prácticamente imposible el resolver el sustento ó sustentabilidad de una familia, dentro del desarrollo de una región, sin el adecuado cuidado de los suelos. Por ello los suelos volcánicos que poseen extraordinarias cualidades físicas y químicas, pero con restricciones por riesgos de erosión, y fijación de P, aparecen como prioritarios para su conservación y manejo sustentable/sostenible, que deberán estimular líneas de trabajo multidisciplinario en al menos:

- ◆ Investigación sobre las interacciones ecológicas y socioeconómicas en los sistemas agroforestales con café.
- ◆ Producción y comercialización de un café sostenible y de calidad.
- ◆ Sistemas de diversificación para fincas cafetaleras en zonas marginadas.
- ◆ Evaluación de servicios ambientales en las cuencas cafetaleras.
- ◆ Impulso a las prácticas de manejo, conservación y restauración de suelos cafetaleros.
- ◆ Impulsar el potencial ecoturístico en las zonas cafetaleras
- ◆ Elaboración de propuesta de carácter tecnológico y económico que conduzca a la estabilidad ecológica, económica y social de los agro-ecosistemas cafetaleros mediante el reconocimiento económico de los beneficios integrales que éstos proporcionan, provenientes del cultivo en las cuencas hidrográficas respetando principios de equidad social y ambiental para un desarrollo sustentable.
- ◆ Mejoramiento de las condiciones económicas, culturales y de salud de los cafeticultores.

CAPITULO 3. OBJETIVOS

3.0 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la relación del P en suelos volcánicos andisólicos cultivados con café, usando diferentes fuentes y dosis de P en condiciones de campo en una parcela experimental

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades físicas y químicas de suelos derivados de cenizas volcánicas cultivadas con café
- Comparar la eficiencia de dos fuentes de P: Roca Fosfórica y Superfosfato Triple, en fórmulas completas N-P-K en suelos volcánicos y en plantas de café
- Determinar el efecto de dos fuentes de P en el contenido de: suelos, foliar, pulpa, pergamino y café oro
- Evaluar en las variables de respuesta, el comportamiento del P en cuatro épocas del año y durante cinco años
- Evaluar el efecto residual de las fuentes fosfatadas utilizadas, analizando suelo y planta de café
- Comparar el efecto del abono orgánico en los contenidos de P sobre las variables de estudio
- Conocer las correlaciones de los contenidos de P en las variables suelo-planta-café

CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1. LOCALIZACIÓN

Este experimento de campo se realizó en la Finca Cafetalera San Jerónimo, en el Ejido 11 de Abril, del Municipio de Unión Juárez, de la zona Soconusco del Estado de Chiapas, cuyas coordenadas son $92^{\circ}08'09''$ N Y $15^{\circ}02'20''$ y 740 msnm (figura 43 y 44).

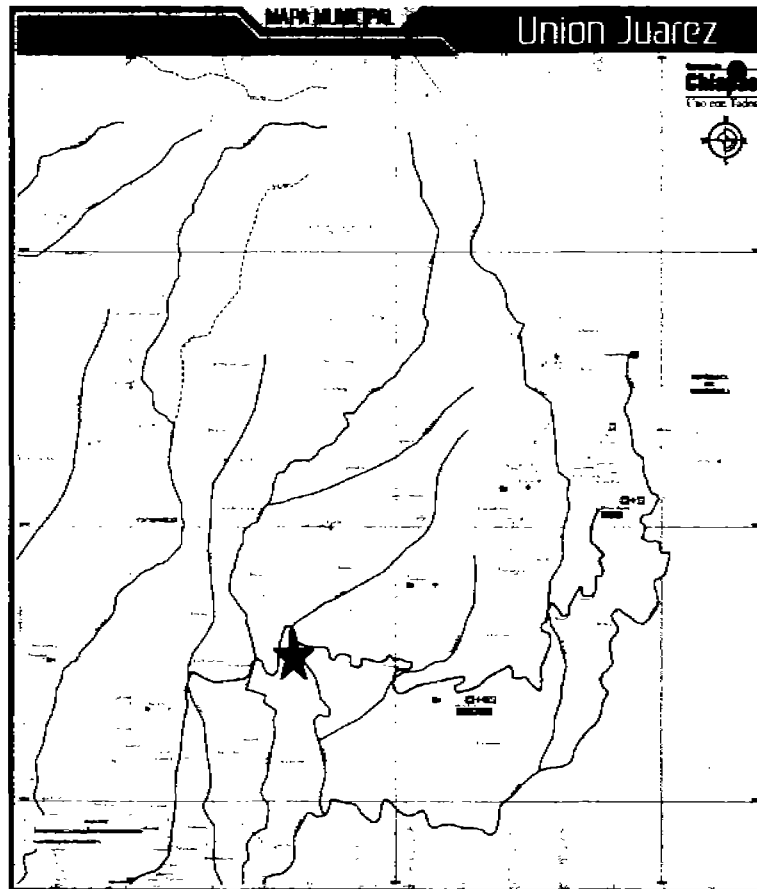


Figura 43. Ubicación de la Finca San Jerónimo Mpio. Unión Juárez ★

4.2. GEOLOGÍA

La región del Soconusco donde se ubica la zona volcánica del experimento en la presente investigación, tiene como basamento el macizo ígneo intrusivo granítico, donde también se encuentran rocas metamórficas de la era Paleozoica y Precámbrico, penetradas por las intrusiones grano-dioríticas, los cuales fueron cubiertos con depósitos de rocas y productos extrusivos del Volcán Tacaná, dominando la andesita hipersténica de hornblenda (Helbig, 1964; Macías *et al.*, 2002) (fig. 44).

4.3. CLIMA

La región volcánica del Tacaná es una de las zonas de Chiapas con una gran diversidad altitudinal y climática, por lo que presentan altos niveles de precipitación pluvial.

A continuación se presentan los siguientes tipos de clima representativos en la zona (García, E. 1973):

- (A)C(m) La mayor parte de la zona (57%), presenta un clima semicálido, templado húmedo, temperatura media anual mayor del 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; con precipitación anual mayor de 1000 mm y precipitación del mes más seco de 0 a 60 mm; lluvias de verano del 5% al 10.2% del total anual.
- Am El clima cálido húmedo representa alrededor del 19% de la zona, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con precipitación anual mayor de 1,000 mm y precipitación del mes más seco de 0 a 60 mm; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.
- C(m) El clima templado representa el 22% de la zona, con temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y la temperatura del mes más caliente bajo 22°C, húmedo, precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.
- C(w2)x Un 2% de la zona tiene una temperatura templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más calientes bajo 22°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano mayores al 10.2% anual.

Por lo que se refiere a la zona donde se estableció el experimento, se presenta un clima cálido húmedo con lluvias en verano, del tipo Am(w'')ig, de acuerdo a la clasificación de Koepen, modificado por García, E. (1973). Esta es una de las regiones de más alta precipitación del país, ya que en años de lluvia extraordinaria se reciben más de 5,000 mm anuales, repartidas entre cien a doscientos días al año. Prácticamente se presenta lluvias todo el año, pero la estación lluviosa comienza más o menos en mayo y tiene dos períodos acentuados de precipitación, uno en junio-julio y otro en septiembre-octubre (fig. 45). Esta intensa precipitación tiene como factores las altas serranías del Tacaná y de las sierra guatemalteca como medios que acumulan y concentran una gran cantidad de nubes y humedad, aunados a la acción combinada de los vientos alisios, monzones, nortes y aunque los huracanes no afectan directamente a la región, los remanentes de éstas, conocida como tormentas tropicales, han causado intensas precipitaciones y daños cuantiosos en la zona, como las producidas por el huracán Stan en el 2005 y Mitch en 1998, generando enormes impactos en la economía, en la agricultura, en la infraestructura, en la sociedad y en el ambiente de ésta región.

En la zona, la intensa precipitación aunado a las temperaturas medias anuales de 25°C, (fig. 46), son los responsables del intenso intemperismo químico sobre los productos volcánicos que conjuntamente con los otros factores formadores de suelos, han generado suelos desarrollados (Ramos, 1979, 1982).

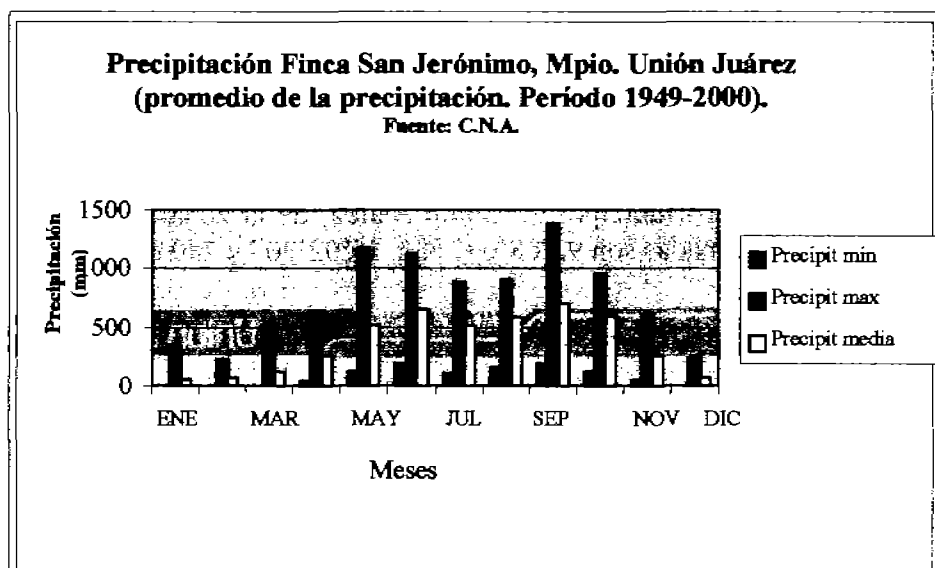
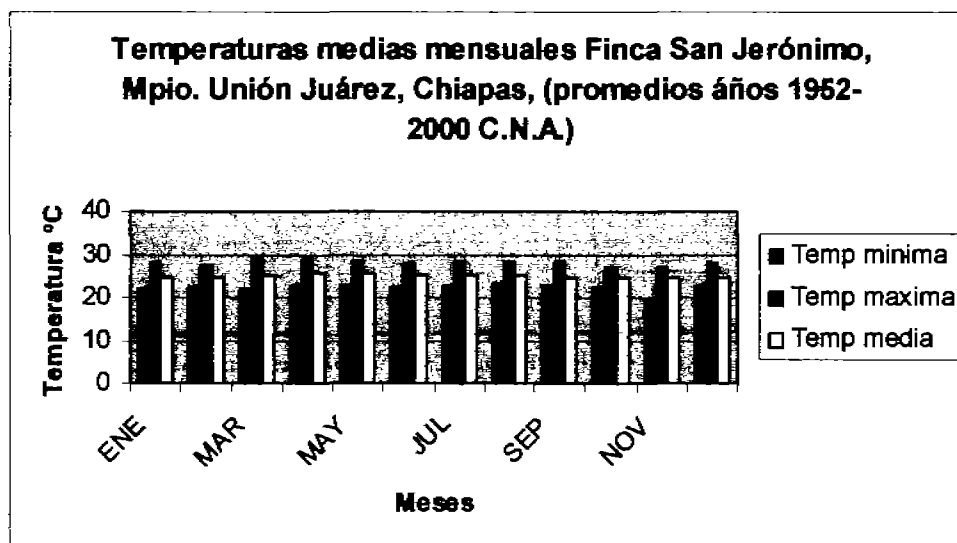


Figura 45. Distribución de la precipitación en la Finca San Jerónimo, Mpio. Unión Juárez, Chiapas.



Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2003.

Figura 46. Distribución de las temperaturas en la Finca San Jerónimo, Mpio. de Unión Juárez, Chiapas.

4.4. VEGETACIÓN

A pesar de presentar una fragmentación significativa de la vegetación, la zona del Volcán Tacaná se caracteriza por tener una gran diversidad ecosistémica (selva alta, mediana, bosque mesófilo, bosque de coníferas), además de tener importancia biogeográfica en cuanto a la distribución de flora, como consecuencia de su gran variación altitudinal, cuya conformación geográfica lo aísla de otras regiones volcánicas de México, siendo la única selva húmeda del lado del Pacífico en México. Por el impacto sobre su flora original, se encuentran también numerosas áreas de vegetación secundaria. La zona del Tacaná tiene una gran importancia también porque representa el límite de los taxa del norte, de las zonas alpinas y subalpinas y del límite septentrional de taxa andinos (Rendowski, 1978; Breedlove, 1981).

La región del Soconusco en Chiapas, y hasta la región adyacente al Volcán Tajomulco, constituyen una isla climática húmeda, con precipitaciones que varían de 2,000 a 7,500 mm. Inmersa en la costa del Pacífico entre las áreas secas del Istmo de Tehuantepec y de El Salvador. Por lo anterior, el Soconusco es la única área entre Costa Rica y el límite del Chánjale Septentrional susceptible a desarrollar selvas tropicales húmedas (de planada y de montaña) y, por ésta razón, se le considera como un centro de refugio de especies neotropicales asociadas a estos ecosistemas durante las etapas glaciales del Pleistoceno. La selva alta perennifolia se ubica en las partes bajas y generalmente intercaladas con agricultura y vegetación secundaria.

A continuación se describen los tipos de vegetación de la región del volcán Tacaná (Miranda, 1942, 1952, 1953, 1957 y 1963; Rzedowski, 1978; Breedlove, 1981).

a) Selvas medianas siempre verdes

Esta clase de selva es muy densa con muchos arbustos y generalmente gran abundancia de helechos, algunos arbóreos, y de musgos en la vegetación inferior y sobre troncos y rocas. Su altura oscila de 15 a 30 metros y muchos de los árboles tienen hojas algo coriáceas y brillantes.

Casi todas las especies arbóreas que la constituyen tienen hojas persistentes, por lo que en ninguna época del año se ven en ella árboles desnudos de follaje. Esta selva se desarrolla en las laderas de serranías abruptas del volcán Tacaná, entre los 1,200 y los 2,300 m de altitud, a veces aun más arriba, en los lugares donde las nieblas son casi constantes. En estas partes del volcán el ambiente frío y húmedo es uniforme a lo largo del año, las lluvias son frecuentes en cualquier época del año y a menudo en forma de lloviznas.

En la vegetación herbácea o arbustiva, más exuberante que en las selvas altas, hay muchas especies decorativas, provistas algunas de hermosas flores, en los géneros *Besleria* (Gesneriáceas), *Bomarea* (Amarilidáceas), *Cavendishia* (Ericáceas), *Centropongo* (Campanuláceas), *Cephaelis* (Rubiáceas).

Son notables en los claros producidos por derrumbes, las enormes y vistosas hojas de la capa de pobre (*Gunnera insignis*). Las orquídeas y bromeliáceas epífitas son innumerables.

En esta clase de vegetación también es muy común encontrar selvas de mano de león (*Chiranthodendron pentadactylon*) que se encuentran en pequeñas zonas a lo largo de la Sierra Madre y en especial alcanza su mejor desarrollo en las laderas del volcán Tacaná, donde en ciertas partes constituye casi un piso altitudinal de vegetación hacia los 2,400 ó 2,500 metros. El mano de león es el mismo árbol famoso de las manitas o macpaxochitl de los aztecas; las selvas en que dominan son densas y húmedas con altura media de 20 a 25 m, los árboles tienen troncos cortos y gruesos. Sus flores son muy características, con los estambres reunidos hacia el centro de la flor formando una especie de mano.

b) Bosques de hojas planas y duras (encinar)

El encinar constituye, junto con el pinar, la vegetación más difundida en las tierras templadas de Chiapas, en la zona del volcán Tacaná lo podemos encontrar desde los 900 msnm hasta los 4,000 m de altitud. En la Sierra Madre por lo general los encinares ocupan los terrenos de suelos más profundos y los pinares los de suelo más somero, pero se pueden encontrar mezclados encinos y pinos.

Algunos ejemplos son *Quercus corrugata*, y Chanjale colorado (*Quercus oocarpa*) ambos de grandes bellotas, forman manchas de encinar dentro de la selva alta siempre verde o intercalados en la misma. Estos encinares alcanzan gran altura en su estado primitivo, oscilando entre los 35 y los 50 metros.

c) Bosque de hojas aciculares o escamosas (pinar)

Esta clase de bosque, especialmente el pinar, constituye el tipo de vegetación que cubre mayor superficie de las tierras templadas y frías del territorio de Chiapas.

En el volcán Tacaná este tipo de vegetación se encuentra solo en una pequeña porción territorial ya que su límite superior es el límite de la vegetación arbórea que en Chiapas, se encuentra situado hacia los 4,000, ya casi en la propia cima (4,060 metros) donde se halla libre de vegetación arbórea como consecuencia de un clima demasiado frío que no permite su desarrollo. Son bosques generalmente altos y uniformes, de pinos y ocotes.

Los pinares de *Pinus hartwegii* y *Pinus rudis* cubren por completo los terrenos de clima muy frío situados entre los 2,800 metros y el límite de la vegetación arbórea hacia los 4,000 metros. Solamente en los lugares más escarpados y húmedos entre los 2,800 y los 3,500 metros ceden lugar a los bosques de romerillo (*Abies guatemalensis*). En la mayor parte de los pinares la vegetación inferior está constituida por praderas de gramíneas.

El bosque de romerillo (*Abies guatemalensis*), llamado también pinabeto en la región del Soconusco y plumajatzit en el Zoque de la zona de Tapalapa, se encuentra en

Chiapas prácticamente limitado a ciertas regiones, tal como la Sierra Madre donde estos bosques están desarrollados en el cerro Malé y en el Tacaná, entre los 3,000 y 3,500 metros.

La vegetación inferior del bosque de romerillo suele ser muy densa y variada, con numerosas plantas herbáceas y arbustivas provistas de flores de brillante colorido.

Los bosques de hojas escamosas comprenden las agrupaciones de ciprés nuculpat (*Cupressus lindleyii*), las de ciprés común (*Juniperus gamboana* y *Juniperus comitana*) y ciprés enano (*Juniperus standleyii*). Los primeros se encuentran entre los 1,800 y 3,000 metros de altitud, en lugares generalmente húmedos y de suelo profundo del volcán Tacaná. Generalmente el ciprés nuculpat no constituye agrupaciones uniformes, sino que se entremezcla con el pinar o con los bosques de romerillo.

El ciprés enano forma matorrales de 0.5 a 2 metros de altura en los lugares rocosos y extraordinariamente fríos que se encuentran situados por encima del límite de la vegetación arbórea en el volcán Tacaná, por encima de los 4,000 metros.

d) Páramos de altura

En Chiapas solamente se encuentra este tipo de vegetación hacia la cumbre del Volcán Tacaná, pues en ninguna otra parte del estado alcanza suficiente altitud para su desarrollo. Los páramos se encuentran en los lugares descubiertos cerca del límite de la vegetación arbórea hacia los 4,000 metros o por encima de dicho límite.

Este tipo de vegetación es semejante al zacatonal, sólo que las gramíneas que lo constituyen son más bajas, formando cuando están cercanas unas a otras una pradera.

e) Chusqueal

Este tipo de vegetación nunca había sido reportado para México. Consiste en una asociación de gramíneas de gran tamaño con aspecto de bambú, en la que domina el género *Chánjale*. El Chusqueal aparece sobre las paredes de cañadas pedregosas en áreas de clima templado y frío.

Situación actual de los bosques y selvas en el Volcán Tacaná.

El impacto de las actividades del hombre se ha centrado sobre estas selvas desde los tiempos prehispánicos dadas las características climáticas favorables para la agricultura que puede llevarse a cabo ininterrumpidamente y sin necesidad de riego durante todo el año, con la introducción de cultivos perennes como café, cacao, plátano, mango y agricultura de temporal principalmente.

En la zona de trabajo, el uso del suelo ha sufrido una gran transformación. La mayor parte de la superficie está ocupada por el cultivo de café. Solo unos escasos "manchones" de vegetación original permanecen en sitios inaccesibles (figs. 47 y 48).

De acuerdo a Miranda, (1942, 1952, 1953, 1957 y 1963), Breedlove (1981), Rzedowski (1978), que estudiaron la vegetación de esta zona, señalan que está esencialmente constituido por el Bosque Tropical Perennifolio y de Bosque Mesófilo de Montaña, con dominancia de *Terminalia amazonia* ("guayabo volador", a los cuales las acompaña las siguientes especies: *Aspidosperma megalocarpon*, *Myrexylon balsamum*, *Vataire Lundellii*, *Scheelea preussii*, *Dendropanax arboreus*, *Calphilum brasiliense*, *Ficus crassiuscula*, *Bursera simaruba*, *Tetrorchidum rotundatum*, *Stercularia apetala*, *Roseodendron donell-smithii*, *Cecropia obtusifolia*, *Cecropia peltata*, *Platymiscium dimorphandrum*, *Picus involuta*, *Alchornea latifolia*, *Mabea excelsa*, principalmente. En esta comunidad biológica compleja predominan los árboles siempre verdes de más de 25 m de alto en la cual son características gran número de lianas, epifitas, enredaderas y plantas parásitas.



Figura 47. Finca cafetalera, transformación del medio para el cultivo de café.



Figura 48. Árboles de sombra del género *Inga* para el café.

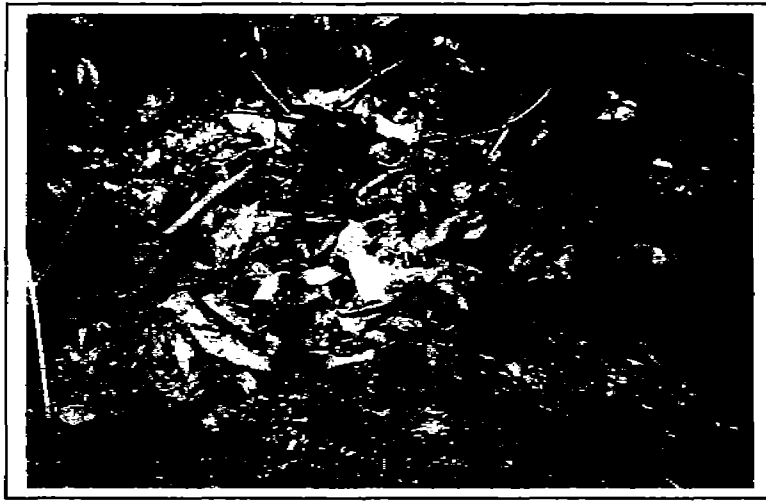


Figura 49. Hojarasca y materia orgánica del cafetal.

No obstante lo anterior, el cultivo de café, es considerado un “agroecosistema”, que permite el mantenimiento de ciclos biogeoquímicos, ya que permanecen árboles de sombra, generalmente del género *Inga*, leguminosa que aporta importantes cantidades de hojarasca, adicionalmente con el aporte de materia orgánica producto de las podas, troncos, hojas de los cafetos, generan proporciones importantes de materia orgánica a los suelos (figura 48).

4.5. EDAFOLOGÍA

El material parental del que dependen los suelos de esta región, son tanto de origen granítico, granito-diorítico, andesíticos y de cenizas volcánicas, por consecuencia, difieren ampliamente en su estructura, textura y fertilidad principalmente (Ramos, 1979).

Los Andisoles constituyen un grupo de importancia primordial en esta región no tanto por su extensión geográfica, sino por razón de sus considerables reservas de fertilidad que han sustentado a gran número de agricultores tradicionales durante siglos. Sus limitaciones principales son la posibilidad de erosión por ubicarse en las laderas del Volcán y la carencia de fosfatos debido a la fijación por la naturaleza mineral, coloidal y orgánica, en formas no aprovechables para las plantas en desarrollo.

Estos suelos se caracterizan porque morfológicamente se han desarrollado a partir de cenizas volcánicas del Cuaternario y depósitos recientes. Cuando son muy recientes presentan perfiles AC a menudo sepultando a suelos más evolucionados, pero con la presencia de un epipedón mólico o úmbrico, en cambio cuando son juveniles presentan perfiles A(B)C.

Los Andosoles húmicos se hallan presentes en los estratos de cenizas volcánicas más antiguas y más meteorizadas en zonas de alta pluviosidad, constantemente húmedos.

Los Andosoles mólicos parecen estar generalizados en las zonas húmedas, son moderadamente productivos pero potencialmente erosionables, menos ácidos y con un contenido más elevado de bases y fosfatos aprovechables que los andosoles húmicos, se

utilizan principalmente para el cultivo del cafeto, cítricos y varios cultivos de subsistencia entre ellos frijol y maíz (Ramos, 1979, 1982; FAO, 1991, 1998).

Los depósitos de cenizas volcánicas más antiguos y meteorizados dan origen a Luvisoles crómicos rojizos. Los regosoles se hallan presentes en tierras altas, principalmente donde se presentan depósitos de cenizas volcánicas recientes que no han tenido tiempo de rebasar las fases iniciales y donde la pendiente es tan pronunciada que no permite la formación de suelos profundos.

El Cambisol dístico se encuentra principalmente sobre rocas silíceas tales como granito, diorita, en regiones montañosas con una precipitación de alta a muy alta. Se observan fases líticas en las laderas montañosas escarpadas. Con los sistemas tradicionales estos suelos dan cosechas insatisfactorias y son también muy susceptibles a la erosión. Los suelos más comúnmente asociados son Acrisoles orticos, los cuales se aprovechan para cafetales y huertos de cítricos.

Los Luvisoles férricos se observan en las tierras bajas costeras, asociados con Cambisoles dísticos y con Acrisoles. Están formados principalmente a partir de materiales silíceos en condiciones ambientales tropicales húmedos.

En general, la relación arena/limo/arcilla es variable siendo algunos arenosos, arcillosos, francos, limo arenosos, limosos. El pH está comprendido entre intervalos de 4 a 6.5, es decir de extremadamente ácidos a ligeramente ácidos, debido a la intensa pluviosidad de la zona. El contenido de materia orgánica fluctúa según la localidad, altitud, temperatura, precipitación y el tiempo que los suelos han estado sujetos a cultivo, la intensidad de cobertura y sombra, el grado de exposición a la pendiente y su grado de erosión.

Los suelos son, en general, altos en K, todos ellos son relativamente pobres en N y bastante deficientes en P. En ciertas áreas se han encontrado deficiencias de oligoelementos y toxicidad por Al (FAO, 1976, 1998; Ramos, 1979, 1982).

Como consecuencia de la fertilidad natural de estos suelos se ha cultivado café en ciertas áreas durante muchos años sin agregar fertilizantes químicos.

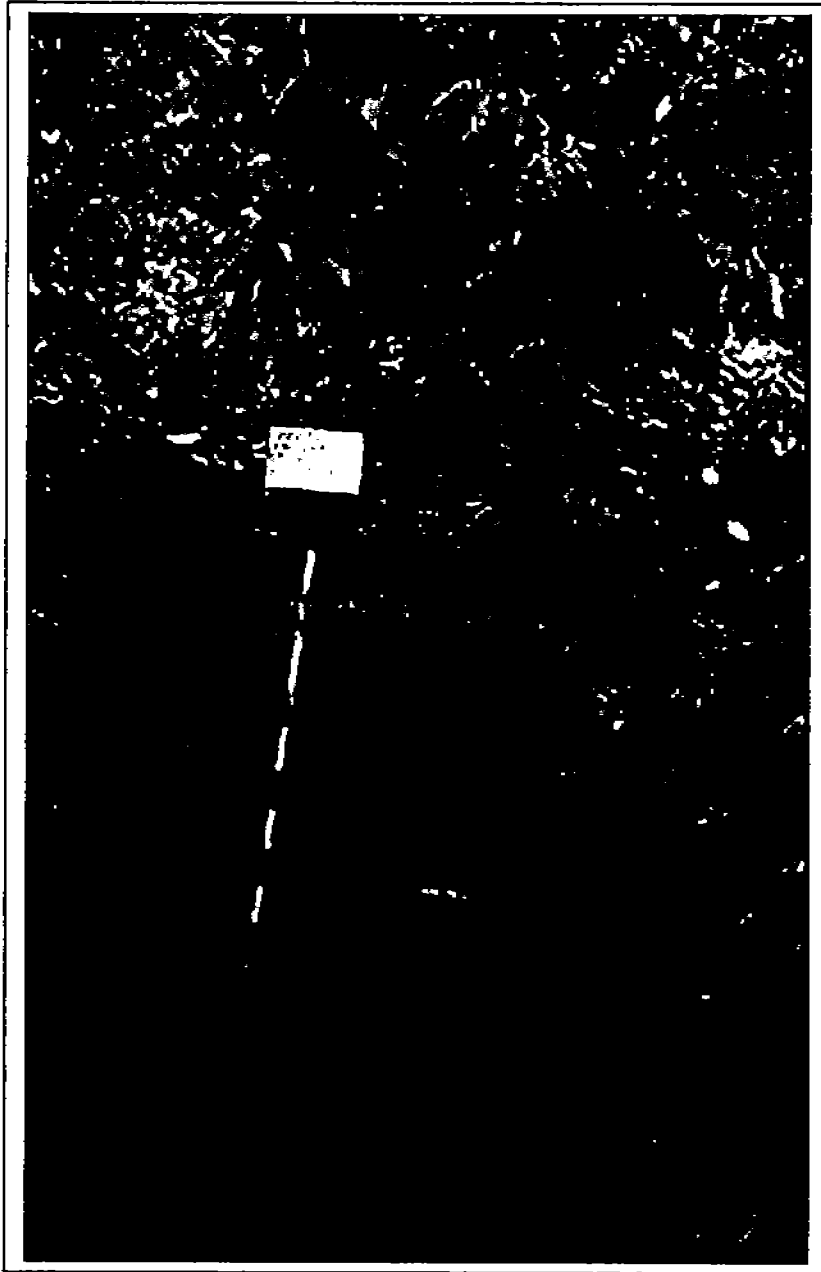


Figura 50.
Perfil del suelo andisólico
de la Finca Cafetalera de
San Jerónimo, Mpio. Unión
Juárez, Chiapas.

Los suelos de la zona del experimento fueron clasificados de acuerdo con SSS, USDA (1999), dentro del Orden Andisol, Suborden Umbrandept. Se realizó la descripción morfológica del suelo y se colectaron muestras para ser analizados en el Laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

4.6. USO DEL SUELO

La actividad a la que están sometidos estos suelos, es la cafecultura. Este cultivo se estableció en la zona Soconusco, desde principios del siglo pasado, pero particularmente desde mediados de siglo se impulsó y expandió en la zona, talándose y deforestándose extensas áreas de bosque tropical.

La variedad de café *Coffea arabica* (típica) es con mucho, la más cultivada, aunque *Bourbon* ya había sido introducida. *Caturra* es de introducción relativamente reciente y *Maragogipe*, que se cultiva en escala limitada sobre las partes bajas de la vertiente del Pacífico. También se cultivan las variedades *Mundo novo* y *Robusta*. Los árboles de sombra más utilizados son el "chalum" *Inga micheliana*, y el "caspirol" *Inga laurina*, pero también se usan la euforbiácea "canaco" *Alchornea latifolia*. Inmecafé (1978).

El rendimiento promedio es de 800 kg/ha, pero algunas fincas bien dirigidas tienen rendimientos hasta de 1,400 a 1,800 kg/ha (Inmecafé, 1978). En cuanto al proceso de trabajo agrícola que se realiza en el cultivo de café, es en general: siembra, resiembra que se reproduce constantemente: agobio, deshije, fertilización, limpia, poda y cosecha (que se sitúa entre septiembre y enero); la limpia se realiza entre mayo y septiembre. La cosecha tiene que llevarse a cabo en varias pizcas, ya que por el clima reinante no interrumpido por una época de secas bien definida, tanto la floración como la fructificación se efectúan durante una temporada de varios meses, que va de octubre a enero.

Dentro de las enfermedades se citan el ojo de gallo *Mycena citricolor*, *koleroga* y se combate cualquier brote de *Hemileia vastatrix* (roya). Este organismo infecta los tejidos de las hojas y origina en la planta su debilitamiento al causar defoliación en general, lo que trae como consecuencia una reducción sustancial de la cosecha y en casos extremos la muerte de la planta. Inmecafé (1978).

En la actualidad, las zonas cafetaleras de nuestro país, están atravesando por una crisis económica, social y ecológica, como resultado de la disminución de los precios del café. Esta región de Soconusco ha sido una zona productora importante de este aromático que ha colocado a México en lugares importantes por la exportación de este grano a países consumidores europeos y norteamericanos. Sin embargo, otros países incentivaron este cultivo como Vietnam, que aunado a las políticas de libre mercado de éste grano, propiciaron la caída del precio de éste aromático, situación que ha tenido un impacto gravísimo en la economía de estas zonas productoras y de las personas que dependen de este cultivo. Las consecuencias son dramáticas, muchos cafetales abandonados, o cambio de uso del suelo, donde se han tumbado los cafetales para dar paso al maíz, frijol, o ganadería, generándose procesos graves de erosión.

Una de las estrategias para atenuar esta problemática es la producción del café orgánico, en la que el Estado de Chiapas está produciendo volúmenes importantes para la exportación, como una estrategia para contrarrestar esta problemática y propiciar un manejo sustentable del cultivo así como para mejorar el nivel de vida de las comunidades que la producen.

CAPITULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

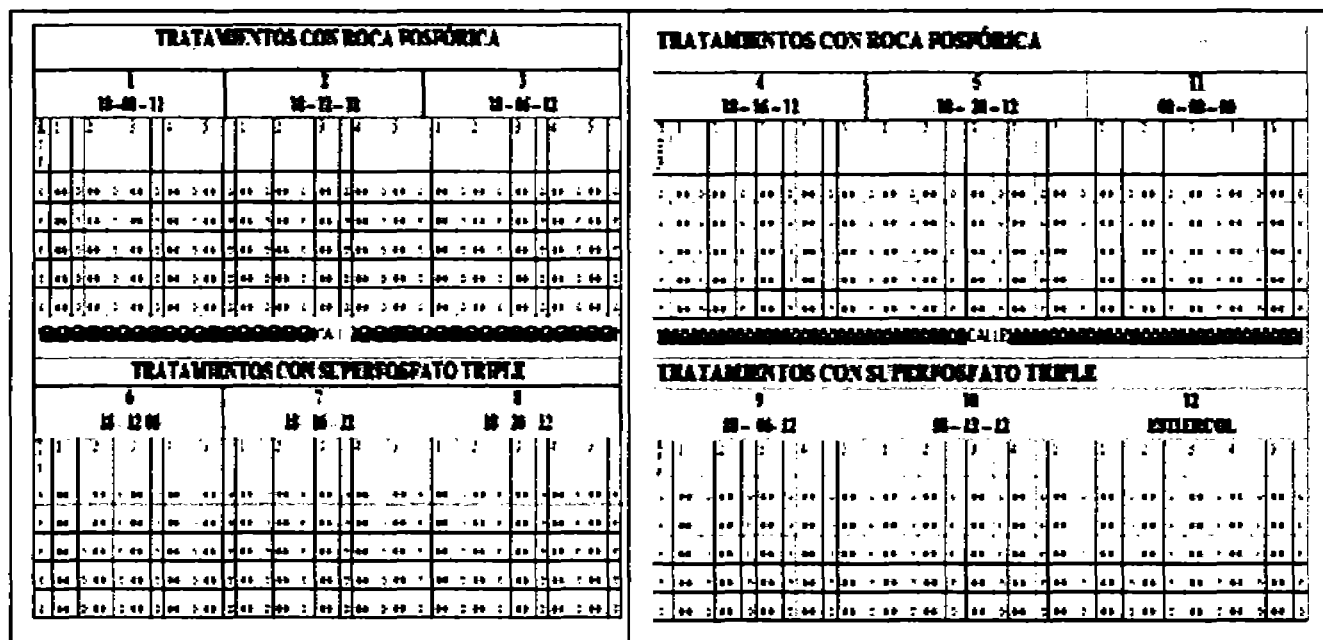
El área destinada por la comunidad para trabajar fue una parcela representativa del área, de pendiente uniforme, cultivada con café de la variedad *C. arábica*, var Catuai, en la Finca San Jerónimo, Mpio. de Unión Juárez, Chiapas, cuyas coordenadas son 92°08'09" Latitud N y 15°02'20" de Longitud W y una altitud de 740 msnm. Los cafetos tenían al inicio del experimento 3 años de edad.

Los suelos fueron caracterizados y los análisis se muestran en los resultados.

5.1. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

El lote experimental fue una franja rectangular, de 120 x 50 m (figura 24 a), con un arreglo en parcelas divididas al azar, con 12 tratamientos (cuadro 24), 5 repeticiones por tratamiento y 10 plantas por repetición. Esto es, 50 plantas en cada tratamiento, más 25 arbolitos entre calles, los cuales hacían 75 plantas por tratamiento, siendo un total de 600 cafetos experimentales (cuadro 26). La unidad experimental fue de 10 plantas

Figura 51. Esquema de la distribución en campo de los tratamientos.
Finca San Jerónimo, Mpio. de Unión Juárez, Chiapas.



● Cafetos experimentales.
Lote experimental de 120 x 50 metros: 6000 m²

Cuadro 24. Croquis del sitio experimental, arreglo y distribución al azar, de los tratamientos

TRATAMIENTOS CON ROCA FOSFÓRICA					
1	2	3	4	5	11
18-00-12	18-12-12	18-06-12	18-16-12	18-20-12	00-00-00
CALLE					
TRATAMIENTOS CON SUPERFOSFATO TRIPLE					
6	7	8	9	10	12
18-12-06	18-16-12	18-20-12	18-06-12	18-12-12	ESTIERCO L

Las variables de respuesta fueron:

Suelo,

Cafetos: respuesta del P en el nivel foliar, café oro, pulpa, pergamino.

Se determinó el efecto de 12 tratamientos en fórmulas completas NPK, teniendo fijos las dosis de N-K, siendo la dosis de P la variable, como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 25. Descripción de tratamientos y dosis de P aplicados en la parcela experimental

No. de tratamiento	Sin P	Muy bajo Kg/ha	Bajo Kg/ha	Medio Kg/ha	Alto Kg/ha
1	TESTIGO				
2	18-00-12				
CON ROCA FOSFÓRICA					
3		18-06-12			
4			18-12-12		
5				18-16-12	
6					18-20-12
CON SUPERFOSFATO TRIPLE					
7		18-06-12			
8			18-12-12		
9				18-16-12	
10					18-20-12
11			18 12 06 FORMULA COMERCIAL		
12	ESTIERCOL DE CABALLO				

Épocas de aplicación fueron: mayo, julio, septiembre y diciembre.

El tiempo de duración del experimento en campo fue de cinco años para la aplicación de tratamientos y muestreos.

En los tratamientos, se mantuvieron fijas las dosis de N y K.

Se analizó como un factorial de años, épocas y tratamientos, sin incluir la interacción triple, por no existir repeticiones verdaderas. Las repeticiones estuvieron internas en una parcela grande dentro de cada uno de los tratamientos, los cuales no permiten una estimación del error experimental, sin embargo resultaron positivos, por lo que son válidas las pruebas de hipótesis usando como error a la interacción triple para las pruebas sobre efectos principales e interacciones dobles, resultando significativos los tratamientos por épocas y tratamientos por año.

Para tener el panorama global de los efectos significativos de los factores, se analizan los efectos principales de año, época con la prueba de Tukey (para comparación de más de dos medias $p=0.01$), así mismo se realizó el análisis de varianza (ANOVA). El análisis de los datos se llevó a cabo con el programa JMP versión 5.01 y con el apoyo del Dr. Ignacio Méndez del IIMAS de la UNAM.

Los experimentos tuvieron una duración de 5 años, en los que se aplicaron los tratamientos y a la vez se muestreaban suelos y material foliar en mayo, julio, septiembre y diciembre, mientras que la cereza de café para obtener café oro, pulpa y pergamino se muestreaban en septiembre y diciembre. Se utilizaron plantas de *Coffea arabica L.* var *catuai* de 4 años de edad (fig. 52)



Figura 52. Aspecto del lote experimental en la Finca San Jerónimo, Municipio de Unión Juárez, Chiapas. Los cafetos experimentales fueron pintados en su base con agua de cal

Cuadro 26. Cuadro de repeticiones y cafetos experimentales en el lote experimental en la Finca San Jerónimo, Municipio de Unión Juárez, Chiapas

No. de tratamientos	REPETICIONES (Número de plantas)					TOTAL
	I	II	III	IV	V	
1 00 00 00	10	10	10	10	10	50
2 18 00 12	10	10	10	10	10	50
3 18 06 12 RF	10	10	10	10	10	50
4 18 12 12 RF	10	10	10	10	10	50
5 18 16 12 RF	10	10	10	10	10	50
6 18 20 12 RF	10	10	10	10	10	50
7 18 06 12 SFT	10	10	10	10	10	50
8 18 12 12 SFT	10	10	10	10	10	50
9 18 16 12 SFT	10	10	10	10	10	50
10 18 20 12 SFT	10	10	10	10	10	50
11 18 12 06 FC	10	10	10	10	10	50
12 ESTIERCOL	10	10	10	10	10	50
TOTAL CAFETOS EXPERIMENTALES						600

RF Roca fosfórica
 SFT Superfosfato triple
 FC Fórmula comercial
 Estiércol: caballo

5.2. DENSIDAD DE SIEMBRA

Se utilizó una densidad de cafetos de 5000 cafetos/ha (con una distancia de 1x1x2 m). Esta densidad de siembra es alta en la zona, y es la utilizada por la comunidad en esta finca.

- 1) El sistema utilizado es de 3 en 1. Significa que se establecen tres plantas en un hoyo, con la finalidad de obtener una mayor producción por hectárea. Esto permite seleccionar en el estado adulto, las plantas más productivas y eliminar la de menor producción.

5.3. FERTILIZANTES INORGÁNICOS Y ORGÁNICOS EMPLEADOS

Los fertilizantes inorgánicos empleados fueron:

- 1) N como Nitrato de Amonio (33% N)
- 2) P₂O₅ como Superfosfato Triple (46% de P) y como Roca Fosfórica (20% de P)
- 3) K₂O como Cloruro de Potasio (60% de K)

- 4) Como material orgánico se utilizó estiércol de caballo, con la siguiente composición:
- N 0.5%
- P₂O₅ 0.11%
- K₂O 0.60

Cuadro 27. Tratamientos: fertilizantes orgánicos e inorgánicos empleados y dosis aplicadas anualmente.

APLICACIÓN DE N - P ₂ O ₅ - K ₂ O POR AÑO EN LOS SUELOS CAFETALEROS EXPERIMENTALES. FUENTES DE FÓSFORO: ROCA FOSFÓRICA Y SUPERFOSFATO TRIPLE. FINCA SAN JERÓNIMO, MUNICIPIO DE UNIÓN JUÁREZ, CHIAPAS.																				
TRATAMIENTO			DOSIS Kg/ha/año				1ª Aplicación Mayo			2ª Aplicación Julio			3ª aplicación Septiembre			4ª aplicación Diciembre			Total	
DOSIS			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Total	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	g/cafeto/año (3 en 1)				
N	P	K	33 %	20 %	60 %		g/cafeto (3 en 1)			g/cafeto (3 en 1)			g/cafeto (3 en 1)			g/cafeto (3 en 1)				
CON ROCA FOSFÓRICA (20%)																				
18	00	12	545	00	200	745	109	00	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	547	
18	06	12	545	300	200	1045	109	180	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	727	
18	12	12	545	600	200	1345	109	360	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	907	
18	16	12	545	800	200	1545	109	480	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	1027	
18	20	12	545	1000	200	1745	109	600	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	1147	
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
CON SUPERFOSFATO TRIPLE (46%)																				
18	00	12	545	00	200	745	109	00	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	547	
18	06	12	545	130	200	875	109	78	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	625	
18	12	12	545	260	200	1005	109	156	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	703	
18	16	12	545	347	200	1092	109	210	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	757	
18	20	12	545	434	200	1179	109	260	60	109	00	00	109	00	60	100	00	00	807	
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
ESTIERCOL (CABALLO)			CONTENIDO %																	
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O															
			0.5	0.11	0.60															

5.4 ÉPOCAS DE APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DURANTE EL AÑO

Tal como se muestra en los cuadros 27 y 28, se fraccionó el N durante las cuatro épocas del año (mayo, julio, septiembre y diciembre), mientras que el P se agregó en una sola época, mayo. El K se dividió en dos aplicaciones, una en mayo y la otra en septiembre, tal como se muestra en el cuadro 28.

Cuadro 28. Distribución y aplicación anual de los tratamientos

	MAYO 1ª FERTILIZACIÓN	JULIO 2ª FERTILIZACIÓN	SEPTIEMBRE 3ª FERTILIZACIÓN	DICIEMBRE 4ª FERTILIZACIÓN
N	1/3 del N	1/3 del N	1/3 de N	100 g. adicionales de N
P ₂ O ₅	Todo el P	-	-	-
K ₂ O	½ de K	-	½ de K	-

Las labores agrícolas practicadas fueron las que se emplean de acuerdo al calendario de los trabajos del cultivo de café en la zona como se muestra en el cuadro 29.

Cuadro 29. Labores culturales desarrolladas en el cultivo de café

CALENDARIO DE LABORES CULTURALES	MES
1ª Limpia con machete	Principios de Abril
1ª Fertilización: 1/3 de N ½ de K Todo el P	Mayo
2ª Limpia con machete Control de plagas y Enfermedades	Junio
2ª Fertilización: 1/3 de N Combate de enfermedades	Julio
3ª Limpia con herbicida Combate de plagas y Enfermedades Poda de selección	Julio Agosto Agosto/septiembre
4ª Limpia con machete	Septiembre
3ª Fertilización 1/3 N ½ K Combate de enfermedades	Septiembre-Octubre Noviembre
5ª Limpia con herbicida	Noviembre
1ª Cosecha	Noviembre
2ª Cosecha	Diciembre
4ª Fertilización 1/3 N	Diciembre.

El fertilizante fosfatado Superfosfato Triple y Cloruro de Potasio como fuente de K, fueron adquiridos en Fertimex, mientras que la Roca Fosfórica fue proporcionada en el CSAT (Centro Superior de Agricultura Tropical de Cárdenas, Tab). Según comunicación del Ing. Alfredo Pastrana investigador del CSAT, la Roca fosfórica proporcionada tiene un 20% de P_2O_5 , pero en forma lentamente soluble, así como un pH entre 5 y 6; que ha dado excelentes resultados en suelos ácidos de Huimanguillo, Tabasco, con dosis hasta 250 kg/ha, en pastos y frijol pelón (comunicación personal).

Los diferentes tratamientos se pesaban y se colocaban en pequeñas bolsas de plástico, usando canastos para ser trasladados a la unidad experimental (figura 53) y ser colocados de acuerdo al arreglo experimental.



Figura 53. Aplicación de los tratamientos en forma circular a 30 cms de distancia al tronco de los cafetos

Todos los materiales se aplicaron en forma granular a manera de corona a una distancia de 30 cms del tronco (fig. 53). El fertilizante fosfatado (P), se enterraba a 5 cms de profundidad. Los otros fertilizantes se cubrían con hojarasca para evitar su lavado.

Cabe agregar que durante los trabajos de campo se contó con el apoyo de 3 peones para el apoyo en la realización de las diversas actividades de campo.

Materiales que se utilizaron en campo fueron bolsas de plástico y papel, etiquetas, costales, lazo, machete, báscula, canastos para transportar los fertilizantes, pala, pico, pala de jardinero, cinta métrica, marcadores, pintura.

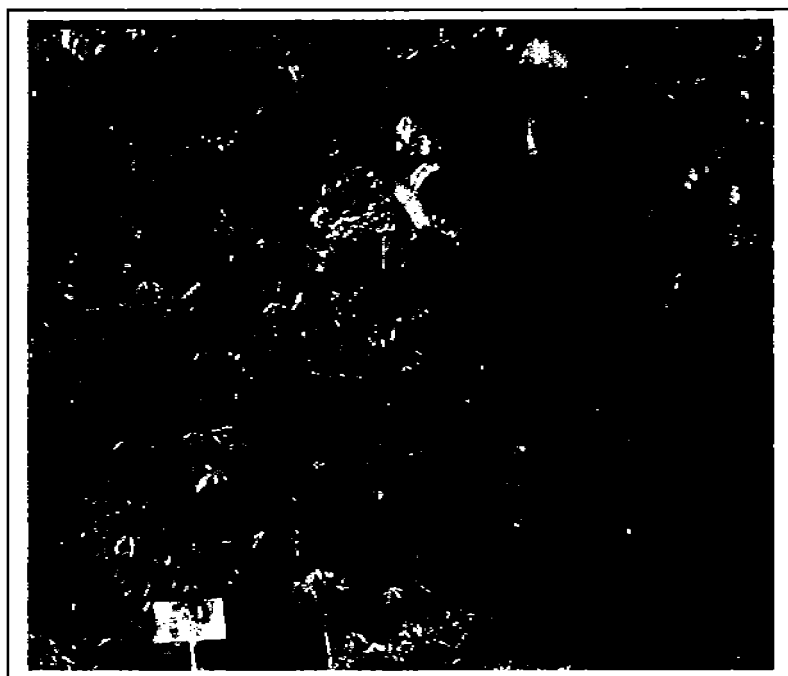


Figura 54.
Aplicación
del tratamiento
18 20 12 SFT

En el campo cada parcela y tratamiento fueron marcados a través de estacas. La distancia de siembra entre matas fue de 1 metro y entre surcos es de 2 metros. Las muestras de suelos eran llevadas al laboratorio, secados a temperatura ambiente, donde se les tamizó para efectuar las determinaciones físicas y químicas correspondientes.



Figura 55.
Aplicación
del tratamiento
18 00 12 RF

5.5. CALCULO DE LOS FERTILIZANTES Y ABONO ORGÁNICO

CÁLCULOS DE DOSIS. Para una densidad de plantación de 5000 plantas/ha.

I. N

180 kg/ha

Nitrato de Amonio 33%

$$\frac{180 \times 100}{33} = 545 \text{ kg/ha}; \quad \frac{545}{5000} = 109 \text{ g/cafeto} \times 3 = 327 \text{ g.}$$

II. P₂O₅

1) Roca Fosfórica 20% P₂O₅

$$60 \text{ kg/ha} = \frac{60 \times 100}{20} = 300; \quad \frac{300}{5000} = 60 \text{ g/cafeto} \times 3 = 180 \text{ g.}$$

$$120 \text{ kg/ha} = \frac{120 \times 100}{20} = 600; \quad \frac{600}{5000} = 120 \text{ g/cafeto} \times 3 = 360 \text{ g}$$

$$160 \text{ kg/ha} = \frac{160 \times 100}{20} = 800; \quad \frac{800}{5000} = 160 \text{ g/cafeto} \times 3 = 480 \text{ g}$$

$$200 \text{ kg/ha} = \frac{200 \times 100}{20} = 1000; \quad \frac{1000}{5000} = 200 \text{ g/cafeto} \times 3 = 600 \text{ g}$$

2) Superfosfato de calcio triple, 46% P₂O₅

$$60 \text{ kg/ha} = \frac{60 \times 100}{46} = 130.43; \quad \frac{130.43}{5000} = 26 \text{ g/cafeto} \times 3 = 78 \text{ g.}$$

$$120 \text{ kg/ha} = \frac{120 \times 100}{46} = 260.86; \quad \frac{260.86}{5000} = 52 \text{ g/cafeto} \times 3 = 156 \text{ g}$$

$$160 \text{ kg/ha} = \frac{160 \times 100}{46} = 347.82; \quad \frac{347.82}{5000} = 70 \text{ g/cafeto} \times 3 = 240 \text{ g}$$

$$200 \text{ kg/ha} = \frac{200 \times 100}{46} = 434.787; \quad \frac{434.78}{5000} = 86 \text{ g/cafeto} \times 3 = 260 \text{ g}$$

III) KCl, 60% de K₂O

$$120 \text{ kg/ha} = \frac{120 \times 100}{60} = 200; \quad \frac{200}{5000} = 40 \text{ g/cafeto} \times 3 = 120 \text{ g}$$

IV) Estiércol de caballo.

5 kg/cafeto. (10 Mg /ha).

5.6. MUESTREOS.

Los muestreos de suelos, material foliar, de pulpa y pergamino de café, se realizaron conforme al siguiente calendario.

Cuadro 30. Épocas de muestreos

MUESTREOS DE SUELOS Y FOLIAR	MAYO
MUESTREOS DE SUELOS Y FOLIAR	JULIO
MUESTREOS DE SUELOS, FOLIAR, DE CEREZA.	SEPTIEMBRE
MUESTREOS DE SUELOS, FOLIAR, DE CEREZA.	DICIEMBRE

Las muestras de suelo se recolectaron en las épocas de mayo, julio, septiembre y diciembre (cuadro 30). La muestra se tomaba de los primeros 20 cm, lugar donde se aplicaban los tratamientos, previa remoción de la capa de hojarasca de la superficie. De esta manera, se obtenía 1.5 kg para los análisis de suelos

El material foliar se colectaba antes de aplicar los tratamientos en las épocas de mayo, julio, septiembre y diciembre, sobre el tercer nudo superior de la planta y del cuarto par de hojas contando a partir del ápice de la rama por ser las más representativas (Jiménez, 1980). Las hojas colectadas de las repeticiones de cada tratamiento, a su vez formaban una muestra compuesta.

Cuando se recolectaron material foliar y cereza de café, se colocaron en bolsas de papel para su traslado. Posteriormente eran lavados con agua corriente y luego con agua destilada. Las muestras de hojas se secaban a temperaturas ambiente y luego eran guardadas en bolsas de papel para su traslado al laboratorio.

Las cerezas de café también se recolectaron por repeticiones de cada tratamiento, en dos épocas de muestreo: septiembre y diciembre. Las cerezas de café recolectadas de las repeticiones por cada tratamiento, a su vez formaban una muestra compuesta. Esta muestra pasaba por el mismo procedimiento de lavado, y luego se efectuaba el despulpado a mano para ser trasladados al Laboratorio. El café despulpado en el Laboratorio se le quitó el pergamino y finalmente el café oro quedó listo para el proceso de análisis químico.

Por último, se estimó el efecto de fuentes y niveles sobre las variables de respuesta en suelos, foliar, pulpa, café oro y pergamino en cinco años de aplicación de los tratamientos.

5.7. ANÁLISIS DE LABORATORIO

En el laboratorio, las muestras de suelos se secaron, se molieron y tamizaron con malla de 2 mm y se guardaron en bolsas de plástico para su análisis.

Con respecto al material foliar, café oro, pulpa y pergamino, en el laboratorio se secaron en estufa a 85°C. La materia ya seca fue molida en un molino Wiley, malla 40. Posteriormente se calcinaba la muestra por dos horas a 475°C.

Los análisis físicos y químicos fueron efectuados en el Laboratorio de Investigación de Edafología del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias de la UNAM y en el Laboratorio de Química Ambiental de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Químicas de la UNAM.

Reacción del suelo (pH) se efectuó en KCl 1N pH 7.0 y H₂O, usando la relación 1:2.5 en un potenciómetro Corning, con electrodos de vidrio y calomel.

Contenido de Materia Orgánica, fue estimado por el método oficial de Dicromato de Potasio en el que se titula su exceso con Sulfato Ferroso, de acuerdo al método de Walkey y Black (1947).

Capacidad de intercambio catiónico total. Se estimó por el método del versenato 0.02N, Jackson (1964), empleando CaCl₂ 1N pH 7, para saturar la muestra luego lavando con alcohol etílico y saturando de nuevo con NaCl 1N pH 7.

Bases cambiables. Se extraen por el método de acetato de amonio 1N pH 7. El Ca y Mg desplazados se titularon por el método del versenato. El K y Na intercambiables se determinaron en un Flamómetro Coleman, Mod. Junior.

Aluminio intercambiable. Por el método de aluminón, Smith *et al.* (1949), en el cual se agita la muestra con KCl 1N pH 8, determinándose con aluminón pH 4.8.

Para la determinación de las formas de P inorgánico en el suelo se utilizó la metodología de Chang y Jackson, con las modificaciones propuestas por SenGupta y Cornfield (1962), en el sentido de extraer los fosfatos no apatíticos antes de la extracción de los fosfatos de aluminio. Las fracciones determinadas mediante ésta metodología y los solventes utilizados fueron: Fosfatos solubles: con ácido acético 0.5N; fosfatos de Ca no apatíticos con ácido acético 0.5N; fosfatos de aluminio con NH₄F, 0.5N, pH 7; fosfatos de hierro con NaOH 0.1N; fosfatos de calcio apatíticos con H₂SO₄ 0.5N.

P total. Fusión con carbonato de sodio, descrito por Jackson (1964).

P orgánico, se determinó a partir del método de ignición de Saunders y Williams (1965), tratando el suelo residual con H_2SO_4 , 0.2N. El P inerte se calculó por diferencia entre el P total la suma de las fracciones inorgánicas y orgánicas. Sen Gupta y Cornfiel (1962).

Fijación de Fosfatos, se determinó de acuerdo a la recomendación de Fassbender e Igue (1967), determinándose el P colorimétricamente. Se pesan 0.5 g de suelo, se le agregan 25 ml de una disolución de KH_2PO_4 conteniendo 100 mg P/l, se agita durante 6 horas, se centrifuga y decanta. En el decantado se determina la fracción de P no fijado en el suelo.

P aprovechable. Por el método de Bray I, determinándose colorimétricamente en un colorímetro Leitz Mod. M, por el método de azul de molibdeno en medio clorhídrico. Jackson (1964).

CAPITULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

6.1. ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS DONDE SE REALIZÓ EL EXPERIMENTO

Cuadro 31. Análisis físicos y químicos de los suelos Andisólicos de la Finca Cafetalera San Jerónimo, Municipio de Unión Juárez, Chiapas

Color	Seco	10 YR 3/3	Pardo oscuro
	Húmedo	10 YR 3/3	Pardo oscuro
Textura	% Arcilla	12.2	Franco arenoso
	% Limo	32.0	
	% Arena	55.8	
Porosidad %			63.0
Densidad aparente	Mg m ⁻³		0.76
Densidad real	Mg m ⁻³		2.10
pH	H ₂ O 1:2.5	5.2	Acidez moderada
	KCl 1:2.5	4.5	Acidez fuerte
Materia orgánica	%	9.8	Muy alto
CIC	cmol(+) kg ⁻¹	20.7	Alta
Ca ²⁺	cmol(+) kg ⁻¹	5.5	Medio
Mg ²⁺	cmol(+) kg ⁻¹	2.0	Medio
K ⁺	cmol(+) kg ⁻¹	0.2	Medio
Al ³⁺	cmol(+) kg ⁻¹	3.12	Alto
Saturación de bases	%	52.3	Medio
P-aprovechable	µg g ⁻¹	3.81	Bajo
P-fijado	%	96.0	Alto
P-total	µg g ⁻¹	1380.0	Alto
P-orgánico	µg g ⁻¹	834.0	Alto
P-inorgánico	µg g ⁻¹		549.0
Fosfato de aluminio	µg g ⁻¹		137.0
Fosfato de hierro	µg g ⁻¹		105.0
Fosfato de calcio	µg g ⁻¹		15.0
Fosfato ocluido	µg g ⁻¹		289.0
Alófano		4x	Muy alto

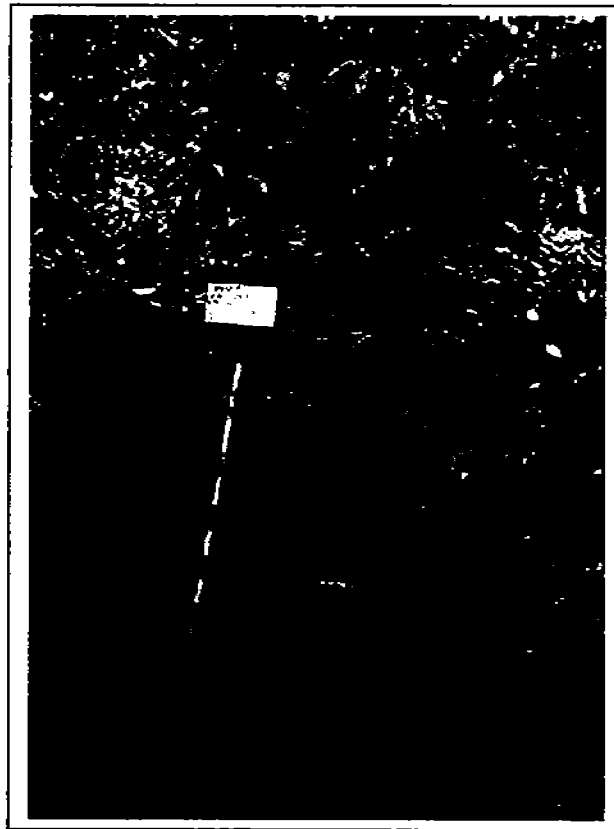


Figura 56. Perfil del Andisol representativo de la zona donde se realizó el experimento

En la zona de estudio de la presente investigación, el material parental más frecuente de los Andisoles, es de naturaleza andesítica ó dacítica y lo constituyen los depósitos de cenizas volcánicas, piroclastos o tefras, aunque también los suelos de Ando pueden desarrollarse a partir de otros materiales volcánicos fuertemente intemperizados, como tobas, brechas volcánicas y lavas (Birrel, 1964; Egawa, 1977; Forsythe, 1969; ICOMAND, 1986; Soil Survey Staff, 1992; Shoji *et al.*, 1996; Alvarado *et al.*, 2001; Besoain *et al.*, 2000).

Los suelos de la zona del experimento tienen colores pardos oscuros, (fig. 56), característicos de contenidos de materia orgánica muy altos, texturas franco arenosas, alta porosidad, baja densidad aparente y real, pH ácidos en agua y en KCl, una alta CIC, cantidades moderadas de Ca, Mg, Na y K, altos en Al^{3+} y bajos en el porcentaje de saturación de bases, como resultado del intemperismo y lavado de bases cambiables (cuadro 31).

El P aprovechable es bajo, lo que concuerda con el alto porcentaje de P-fijado (cuadro 31). Este comportamiento es ampliamente reconocido por diversos autores como

Swindale, (1964); Martini, (1969); Ramos, (1982); Ramos y Aguilera, (1984); Quantin, (1986); Canessa *et al.*, (1987); Sánchez *et al.*, (1990); Beck *et al.*, (1998); Fassbender *et al.*, (1998); Alvarado *et al.*, (2001). Por otro lado, el P-total es alto, lo que está relacionado con el P-orgánico, muy típico de Andisoles con altos contenidos de materia orgánica. En cuanto a los P- inorgánicos, se encuentran dominados por los P-aluminio, siguiendo el P-hierro y el P-calcio, y los ocluidos (cuadro 31).

Tanto las fracciones orgánicas como las inorgánicas son las que influyen sobre el comportamiento del P en el suelo y determinan su escasa disponibilidad para las necesidades fisiológicas de las plantas, tal como lo cita ampliamente uno de los autores que más investigaciones ha dedicado a éste tema en América Latina, Fassbender, (1966, 1968, 1969, 1975); Fassbender *et al.*, (1967, 1969, 1978, 1987), así como en la completa revisión que hace la compilación de Alvarado *et al.*, (2001). En el presente experimento la baja disponibilidad del P determinó el comportamiento de ese elemento tanto en los suelos como en las plantas de café.

De acuerdo a la taxonomía de suelos del USDA (Soil Survey Staff, 1999), en la definición del orden Andisol, establece que el suelo debe presentar propiedades ándicas en 60% o más del espesor de la sección control correspondiente. Estas características se aplican a los suelos de este estudio.

6.2 CONCENTRACIÓN DE P EN EL SUELO

Al inicio del experimento, las cantidades de P en el suelo eran de sólo $3.2 \mu\text{g g}^{-1}$ (cuadro 31. El contenido de P-provechable producto de una muestra compuesta para el suelo testigo fue de $5.0 \mu\text{g g}^{-1}$ (cuadro 32), estos valores son muy bajos, lo que significa una clara deficiencia de este elemento en estos suelos. Mongue, (1999), cita como un intervalo en suelos para el cultivo de café, de 10 a 30 ppm. Otros autores como Ramírez, (1980) y Carvajal, (1984) señalan en general intervalos $<10 \mu\text{g g}^{-1}$ como bajos, de 10-30 $\mu\text{g g}^{-1}$ como medios y $>40 \mu\text{g g}^{-1}$ como altos.

En el cuadro 32, se observa el resultado del análisis de varianza donde la significancia estadística es sumamente alta (0.0001%), lo que mostró el efecto de los tratamientos sobre los parámetros de estudio, como altamente significativa.

Cuadro 32. Análisis de varianza

Fuente de variación	DF	S.C.	C.M.	F
Model	95	65769.679	692.312	21.5171
Error	144	4633.199	32.175	Prob > F
C. Total	239	70402.878		<.0001

Para mostrar el efecto de los tratamientos, los resultados se exponen en la figura 57 y en el cuadro 33, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en P.

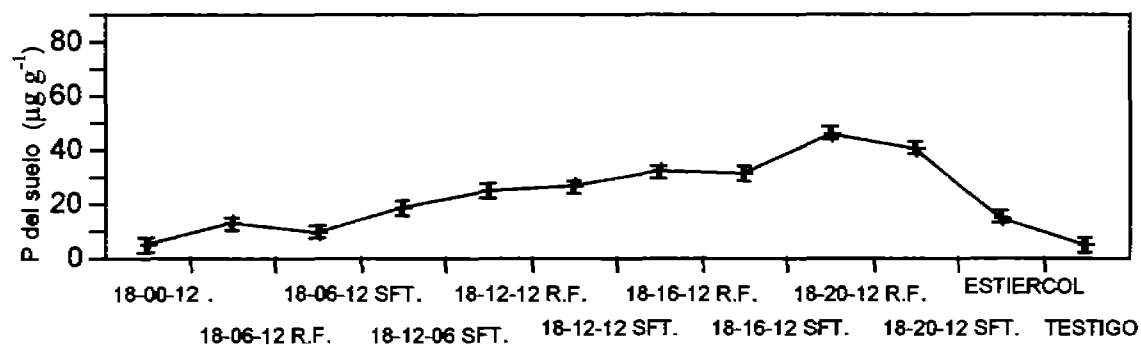


Figura 57. Contenido de P en el suelo con los tratamientos estudiados

En el cuadro 33, se observan las medias de los tratamientos y los contenidos de P en el suelo.

Cuadro 33. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en los suelos

Tratamiento						Cuadrado de las medias. P (µg. g ⁻¹)
18-20-12 RF.	A*					46.297000
18-20-12 ST.	A					40.864500
18-16-12 RF.		B				31.930500
18-16-12 SFT.		B				31.304500
18-12-12 SFT.		B	C			26.369500
18-12-12 RF.			C			24.963000
18-12-06 FC.				D		18.528500
ESTIERCOL				D	E	15.365500
18-06-12 RF.				D	E	12.923000
18-06-12 SFT.					E	9.958000
18-00-12.					F	5.226000
TESTIGO					F	5.000000

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

RF Roca fosfórica

SFT Superfosfato triple

FC Fórmula comercial

Se observa que los tratamientos que estadísticamente dieron los valores más altos fueron los de 18-20-12 los cuales al final del experimento dejaron altos contenidos de este elemento en el suelo, con valores medios de $46.29 \mu\text{g g}^{-1}$ para el tratamiento con RF, y de $40.86 \mu\text{g g}^{-1}$ para el SFT. Con base en el análisis estadístico, estos resultados son equivalentes. Sin embargo, la RF que aunque solo contiene alrededor del 20% de P soluble, produjo un mayor efecto residual en el suelo y por su lenta liberación en suelos ácidos, con el tiempo, pueden dejar P soluble suficiente en el suelo y producir efectos similares a una fuente soluble como el SFT. Estos aspectos han sido reportados por varios autores como Pastrana, (1979), Etchevers y Fernández, (1981), en México; Alegre *et al.*, (1991), en investigaciones en Perú; Córdoba, (1991) en Ecuador; Herrera, (1994); Rivero *et al.*, (2001); Reyes, (1991), en Venezuela.

Al reducirse las aplicaciones de P en los tratamientos intermedios, las medias de los suelos que recibieron dosis 18-16-12 mostraron pocas diferencias y fluctuaron entre 31.93 y $31.30 \mu\text{g g}^{-1}$ para los tratamientos con RF y SFT respectivamente. Las aplicaciones 18-12-12, también elevaron los contenidos en los suelos, con valores de $26.36 \mu\text{g g}^{-1}$ para los tratamientos con SFT y $24.96 \mu\text{g g}^{-1}$ con la RF; estadísticamente sus medias mostraron pocas diferencias entre estos tratamientos. Al respecto, varios autores como Mongue, (1999), cita como un intervalo en suelos para el cultivo de café, de 10 a $30 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm). Otros autores como Ramírez, (1980) y Carvajal, (1984), señalaron en general intervalos $<10 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm) como bajos, de 10 - $30 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm) como medios y $>40 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm) como altos.

Las medias de los tratamientos con las dosis menores de P en la fórmula 18-06-12, mostraron bajas concentraciones, de $12.92 \mu\text{g g}^{-1}$ para la RF y $9.95 \mu\text{g g}^{-1}$ para el SFT, en este caso el efecto fue mejor con el tratamiento con RF que con el SFT tal como se observa en el cuadro 33.

El contenido de NPK del estiércol de caballo que se aplicó en el experimento, en porcentaje, fue N: 0.15, P_{205} : 0.11 y K_{20} : 0.20. Varios autores como Salas, (2001); Soto *et al.*, (2002); Hirzel *et al.*, (2004), señalan que el estiércol de caballo es el que menos porcentaje de P contiene, comparándolo con otros estiércoles como gallinaza, cuyo contenido en P puede ser mayor de $0.35 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm), valor considerado alto. En este experimento el tratamiento con estiércol de caballo, las medias en el suelo mostraron $15.36 \mu\text{g g}^{-1}$ de P. Es posible que la cantidad aplicada de 5 kg por cafeto (10 kg.ha), no haya sido suficiente para elevar los contenidos de P en el suelo, aunque diversos autores citan las propiedades importantes de los abonos orgánicos en suelos volcánicos. El tratamiento con estiércol en el experimento se comportó de forma similar a los tratamientos con bajos contenidos de P, como el 18-06-12, sin embargo, fue mejor que el testigo, pero menor con los tratamientos con altas dosis de P (cuadro 33 y figura 60).

En el presente experimento las altas cantidades de P disponible para las plantas fueron significativamente positivos. Esto se muestra en el cuadro 33, donde el testigo al final de los 5 años de tratamiento continuó con bajos contenidos de P ($5.00 \mu\text{g g}^{-1}$). Los tratamientos que no llevaron P como el 18-00-12 presentaron valores bajos de P ($5.22 \mu\text{g g}^{-1}$), mientras que las dosis medias y altas fueron elevando los contenidos de altos a muy altos de P en el suelo, hasta llegar a valores de $46.29 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm) considerados éstos

suficientes para una adecuada nutrición fosfatada (Ramírez, 1980; Carvajal, 1984; Mongue, 1999).

Los resultados anteriores muestran una clara deficiencia de P en estos suelos y a medida que se incrementaron las aplicaciones de P, mejoró la disponibilidad de este elemento. El mantenimiento de valores altos o suficientes de P en el suelo para las necesidades del cultivo de café, junto con el N y el K, son necesarios para cubrir satisfactoriamente todas las etapas fisiológicas como crecimiento, floración, fructificación y obtener cosechas adecuadas de café, tal como lo citan varios autores reconocidos en este tema como Dunald, 1961; Uribe-Henao, 1972, 1983; Haarer, 1977; Valencia 1977, 1998, 1999; Coste, 1978; Moraes, 1981; Carvajal, 1984; Muñoz, 1984; Guridi *et al.*, 1985; Inmecafé, 1990; Mongue, 1999; Ramírez, 1999.

Las aplicaciones con dosis medias y altas mostraron suficiencia de P con valores altos. Estas cantidades son necesarias pues no solamente satisfacen sitios donde se lleva a cabo la fijación del P, sino que dejan disponible este elemento para que pueda ser utilizado y absorbido por la planta de café (Swindale, 1964; Martini, 1969; Ramos, 1982; Ramos y Aguilera, 1984; Quantin, 1986; Canessa *et al.*, 1987; Beck *et al.*, 1998; Fassbender *et al.*, 1998; Sánchez *et al.*, 1990; Alvarado *et al.*, 2001).

6.2.1 VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN EL SUELO

La prueba del efecto por época (mayo, julio, septiembre y diciembre) fue altamente significativa y los resultados se muestran en el cuadro 34, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en P.

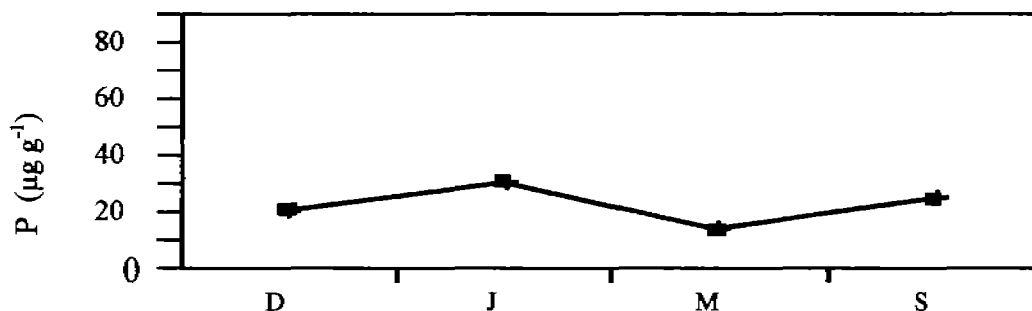


Figura 58. Contenido de P en los suelos en las cuatro épocas del año con los tratamientos estudiados

Las concentraciones de P en el suelo en las diferentes épocas de aplicación y muestreo de suelos, se muestran en el cuadro 34 y figura 58.

Se encontró un menor nivel de P en mayo ($13.76 \mu\text{g g}^{-1}$) y el valor más alto se presentó en julio ($30.66 \mu\text{g g}^{-1}$), que junto con la época de septiembre ($24.55 \mu\text{g g}^{-1}$), seguido por el valor de diciembre ($20.58 \mu\text{g g}^{-1}$), coinciden con los períodos de mayor

precipitación en la zona, que va de junio a noviembre, etapa muy importante desde el punto de vista edáfico y fisiológico para la planta. En el suelo, la humedad de la época de lluvias es fundamental para solubilizar y disolver los fertilizantes empleados, y desde el punto de vista fisiológico porque es el período de mayor actividad en la absorción de nutrimentos por la planta de café, para la fructificación, tal como lo citan Dunald, (1961); Carvajal, (1972, 1984); Uribe-Henao, (1972, 1983); Coste, (1978); Haarer, (1977); Valencia, (1977, 1998, 1999); Ramírez, (1980); Morales, (1981); Rivera, (1983); Muñoz, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Inmecafé, (1990); Fixen, (1994); Ramírez *et al.*, (1999), en tanto que el valor registrado en mayo, muestra la época inicial de aplicación de los tratamientos, tal como se explica en el apartado de material y métodos, y reflejan muy bien el nivel más bajo de P antes de que se aplicaran los tratamientos con P, los cuales se incorporaban en una sola aplicación después de efectuar el muestreo de suelos en mayo.

Cuadro 34. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en los suelos de las diferentes épocas de aplicación

Tratamiento					Cuadrado de las medias. P ($\mu\text{g g}^{-1}$)
J	A				30.666167
S		B			24.554833
D			C		20.587000
M				D	13.768667

Nota: M (mayo), D (diciembre), S (septiembre), J (julio) son las épocas de aplicación de los tratamientos en el año.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

En el presente experimento, luego de cinco años de aplicaciones de P_2O_5 tanto las altas dosis de SFT como con la RF, aumentaron significativamente en todos los casos el contenido en el suelo, a excepción de los tratamientos con estiércol y el testigo, por lo que se observó que hay una respuesta positiva a la aplicación de P, al detectarse más cantidades de P en la solución del suelo que podría ser absorbido por la planta y que puede influir significativamente en la productividad de los cafetales. Estos aspectos también han sido observados por varios autores como Dunald, (1961); López, (1969); Amorin, (1973); Valencia, (1977, 1998, 1999); Ortiz, (1978); Licon, (1979); Malavolta, (1981); Ramos, (1982); Ramos y Aguilera, (1984); Bravo, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Fixen, (1994); Alfaro *et al.*, (1998); Chavarría *et al.*, (1999); Ramírez *et al.*, (1999).

6.2.2 EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN EL SUELO

En el cuadro 32, se observa el resultado del análisis de varianza como significativo y en el cuadro 34, se presenta la prueba de Tukey con las diferencias entre tratamientos.

El efecto acumulativo a través de los cinco años por las aplicaciones de los tratamientos con P en las diferentes fuentes y dosis se muestra en el cuadro 35 y figura 59.

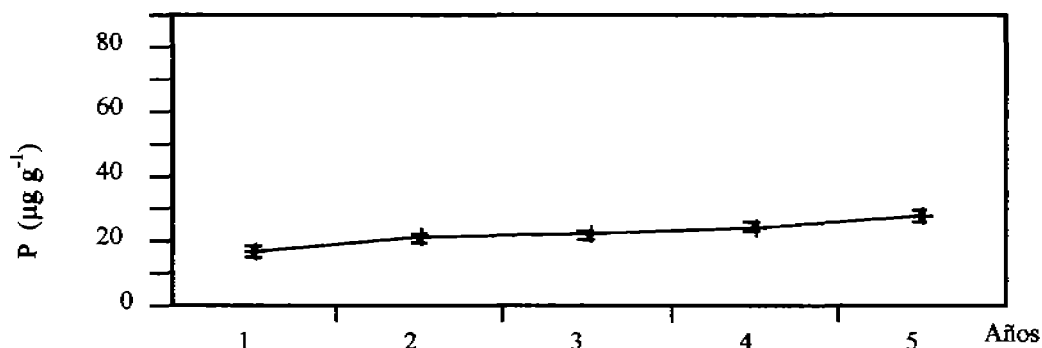


Figura 59. Promedio de los contenidos de P en los suelos después de cinco años de observación

En la figura 59 y cuadro 35 se muestran los efectos en el suelo de los diferentes tratamientos en los cinco años que duró el experimento, en el cual se observa un efecto acumulativo por efecto de las aplicaciones de P, cuyas medias se observan en el cuadro 35 con valores de $16.77 \mu\text{g g}^{-1}$ de P para el primer año de aplicación hasta $27.83 \mu\text{g g}^{-1}$ P, en el último año de aplicación, dando como resultado una concentración alta de éste elemento que tendrá un efecto positivo en la nutrición de la planta de café.

Cuadro 35. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos, contenidos de P en los suelos y el efecto acumulativo a través de los cinco años de aplicación

Tratamiento				Cuadrado de las medias. P (mg g ⁻¹)
5	A			27.834167
4		B		24.506042
3		B	C	21.897917
2			C	20.958542
1			D	16.774167

Nota: 1, 2, 3, 4, y 5 son los años en los que se estableció el experimento.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

Para el análisis conjunto de tratamientos por épocas, en la figura 60, se observan las medias de los contenidos de P a nivel foliar, así mismo abajo de las fórmulas de los tratamientos se señala el valor de "p" (nivel de significancia), para valorar el efecto de los tratamientos entre épocas.

Tal como se observa, los mejores tratamientos fueron los de las fórmulas 18-20-12, los cuales fueron altamente significativos (0.0001), tanto con el superfosfato triple como con el de roca fosfórica, notándose también que el comportamiento en las cuatro épocas del año, los valores encontrados en julio eran los más altos. Se observa también que los tratamientos 18-12-12, 18-16-12, fueron altamente significativos al 0.0001, mientras que el tratamiento testigo, no fue significativo (0.83), ni el tratamiento con estiércol (0.38), como tampoco lo fue el 18-00-12 (0.95). Los tratamientos con bajas dosis de P 18-06-12 RF (0.03) y 18-06-12 SFT (0.35), 18-12-06 SFT (0.054), tampoco fueron significativos.

El tratamiento con mejor nivel de P residual fue el 18-20-12 RF, por lo que puede observarse que es el de mejor efecto acumulativo en los cinco años. Todos los que tenían bajas cantidades de P no fueron significativos en las diferentes épocas y solo cuando hay tratamientos con altos contenidos de P el efecto es significativo, con la tendencia de que de los tratamientos el mas alto es el de julio y el mas bajo en mayo para todos los tratamientos, por lo que, la aplicación de cantidades de P de 12 a 20 % ($\mu\text{g g}^{-1}$) son los mejores. Los tratamientos testigo, así como el tratamiento con la menor dosis e incluyendo el tratamiento con estiércol, muestran las menores concentraciones de P en el suelo.

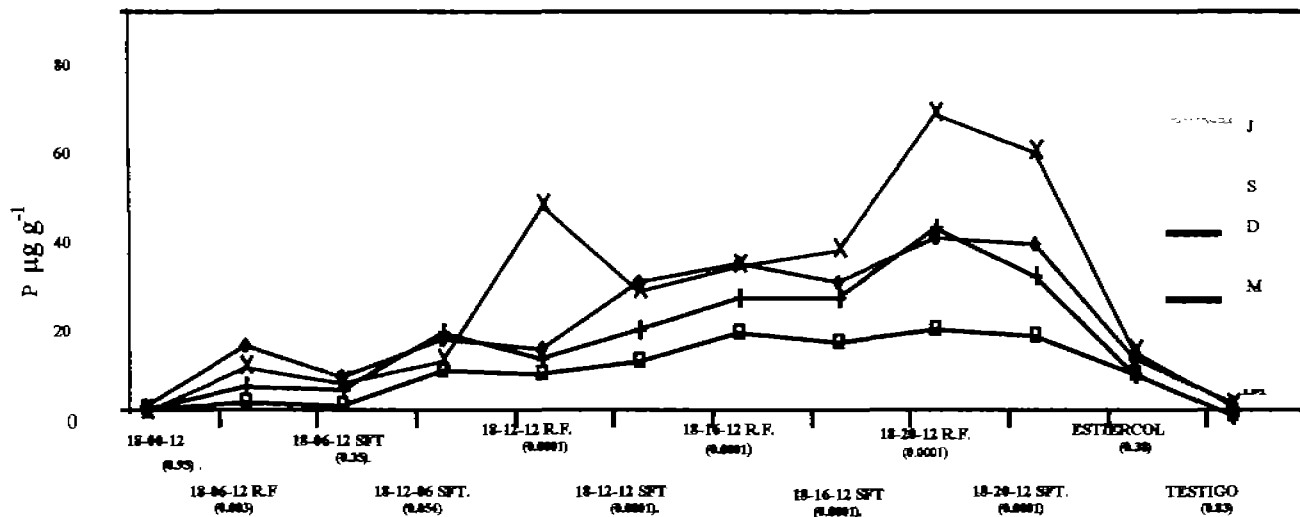


Figura 60. Contenido de P en el suelo por épocas (mayo, junio, septiembre, diciembre) durante cinco años. Abajo de cada tratamiento se señala el nivel de significancia

En la siguiente figura (61), se muestra el contenido de P en el suelo durante los cinco años del experimento y la significancia de los tratamientos, en donde se puede observar que en los tratamientos con las mayores dosis de P, son en los que se encuentran efectos significativos en los diferentes años, siendo la época de julio (gráfica anterior) donde se tienen mayores cantidades de P.

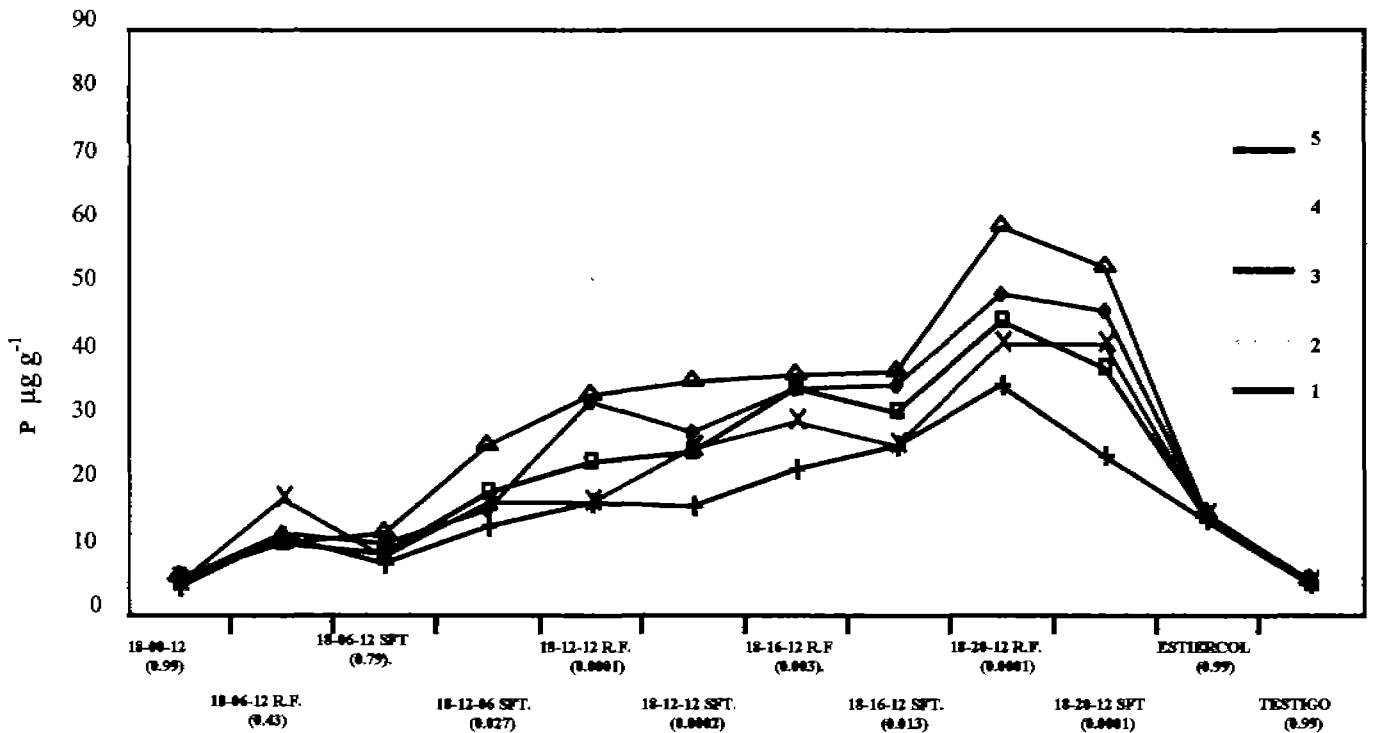


Figura 61. Contenido de P en los suelos durante cinco años de observación. Abajo de cada tratamiento se presenta el nivel de significancia

Se puede observar que durante los cinco años los mejores tratamientos fueron los que contienen las más altas dosis de P, 18-20-12, tanto con RF, como los de SFT (significancia de 0.0001), notándose que en el último año, se alcanza la mayor concentración de P, a través de la RF, seguida por el SFT.

Los tratamientos con dosis intermedias 18-16-12 tanto con RF como con SFT fueron significativos al 0.003 y 0.013 respectivamente, seguidas por los tratamientos que recibieron los tratamientos 18-12-06, con RF y SFT, sus significancias fueron de 0.0001 y 0.0002 respectivamente, en tanto que los tratamientos con dosis bajas, testigo y estiércol, no fueron significativas.

De la figura 61, también puede observarse la evolución de los tratamientos en los 5 años del experimento, en los que se notan los menores contenidos en el año 1, aumentando

paulatinamente a través de los siguientes años, hasta el año 5, en el cual se tiene el mayor nivel de P encontrado con la aplicación de las mayores dosis de P, 18-20-12, tanto con RF, como con el SFT, por lo que puede destacarse que hubo una acumulación progresiva del P.

En cuanto a las fuentes de P, la RF tiene su máximo potencial como fuente de P para la fertilización sobre suelos volcánicos ácidos tal como lo señalan Moraes, (1979); Pastrana, (1979); Fernández, (1981); Smith, (1981); Post *et al.*, (1982); Etchevers *et al.*, (1986); Gichuru *et al.*, (1988); Alegre *et al.*, (1991); Córdoba, (1991); Reyes, (1991); Rojas *et al.*, (1991); Solórzano, (1991); Herrera *et al.*, (1994); Sarpley, (1996); Rivero *et al.*, (2001). En éstos suelos, los ácidos orgánicos disuelven lentamente el P de la roca fosfórica haciéndolo especialmente adecuado para suelos con capacidades muy altas para la fijación de P, además de que presenta un efecto del P residual importante, lo que hace una liberación gradual del P para que se disponga paulatinamente en las etapas del cultivo.

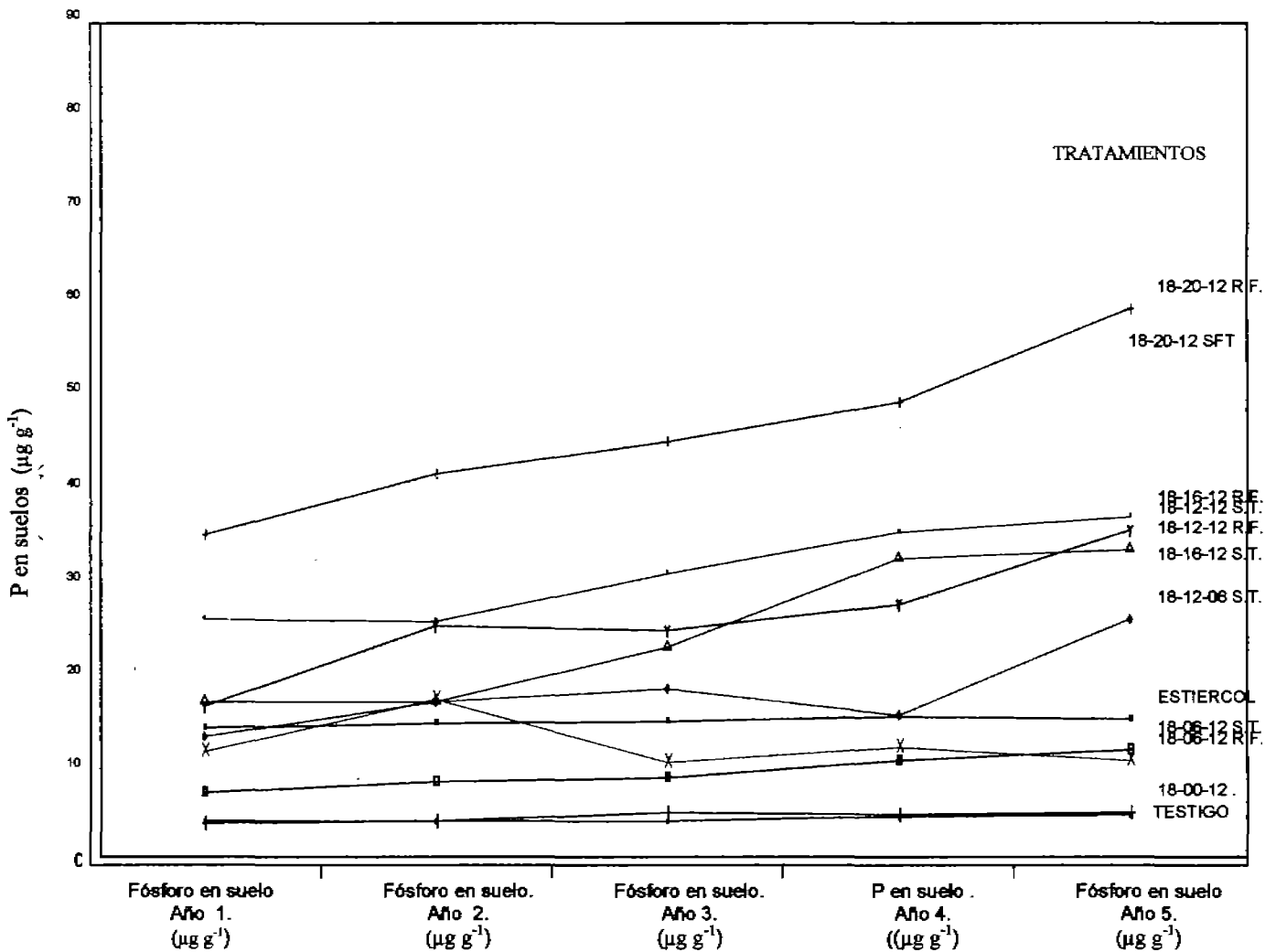


Figura 62. Respuesta global de los tratamientos durante los cinco años de aplicación en el suelo andisólico

En la figura 62, se muestran los efectos globales y evolución de los tratamientos NPK, cuyas fuente de P fueron superfosfato triple (SFT) y roca fosfórica (RF), aplicación de estiércol y los testigos, en las dosis mostradas en el cuadro 33, durante los cinco años del experimento, los cuales aumentaron paulatinamente a través de los siguientes años, hasta lograr la máxima concentración en el año 5. Tal como se observa, durante los cinco años los mejores tratamientos fueron los que contienen las dosis más altas de P, 18-20-12, tanto con RF, como los de SFT (significancia de 0.0001), notándose que en el último año, se alcanza la mayor concentración de P, logrado con la RF, seguida por el SFT.

Los tratamientos con dosis intermedias 18-16-12 tanto con RF como con SFT fueron significativas al 0.003 y 0.013 respectivamente, seguidas por los tratamientos que recibieron los tratamientos 18-12-06, con RF y SFT, sus significancias fueron de 0.0001 y 0.0002 respectivamente, en tanto que se puede ver que los tratamientos con bajas dosis, testigo y estiércol, no fueron significativas.

Se puede observar que la roca fosfórica tiene su máximo potencial como fuente de P en estos suelos volcánicos. Esto ha sido señalado por Pastrana, (1979); Fernández, (1981); Smith *et al.*, (1981); Post *et al.*, (1982); Etchevers *et al.*, (1986); en suelos de México; Reyes, (1991); Rojas *et al.*, (1991); Solórzano, (1991), Herrera *et al.*, (1994); Rivero *et al.*, (2001); en suelos de Venezuela; Smith *et al.*, (1981); Post *et al.*, (1982), entre otros. Los ácidos orgánicos de la materia orgánica que es elevada en éstos suelos, disuelven lentamente el P de la roca fosfórica haciéndolo especialmente adecuado para suelos con capacidades muy altas para la fijación de P, además de que presentan un efecto del P residual importante, lo que hace una liberación gradual para que se disponga paulatinamente en las etapas del cultivo.

Los autores mencionados arriba, señalan también que la roca fosfórica tiene otros efectos mejoradores muy importante para el suelo, como la presencia de Ca y silicatos, y particularmente este último, que es eficiente para hacer más disponible el P a mediano plazo, así mismo, indican que en cuanto a disponibilidad inmediata del P, el SFT es más fácilmente soluble y por tanto disponible para las plantas.

Resultados similares con el uso de la roca fosfórica en suelos de ando, reportan Etchevers *et al.*, (1986), en la Meseta Tarasca de México, así como Alegre y Chumbimune, (1991), en el Perú, los cuales realizaron ensayos de fuentes y niveles de roca fosfórica y superfosfato triple para cultivos de maíz y arroz, comprobando la respuesta positiva a la aplicación de la roca y concluyeron sobre la acción positiva de su aplicación en suelos ácidos, con altos contenidos de materia orgánica, a niveles entre 180 y 200 kg P₂O₅/ha, señalando además del efecto residual de P que es aprovechable para el siguiente ciclo de cultivo.

Así mismo señalan que en un nivel de 180 kg P₂O₅/ha tanto para la RF como para SFT no fueron significativamente diferentes, pero con RF se observaron incrementos mayores en los rendimientos comparando con el testigo y que existe un importante efecto residual. Confirman también que los suelos con aplicación de niveles bajos o medios de P en el suelo, el cultivo de maíz no responde a la aplicación de P, ya sea en forma de RF o SFT, lo que confirma la alta capacidad de fijación de esos suelos.

También en un amplio estudio sobre los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica, Alvarado *et al.*, (2001), Fassbender *et al.*, (1968); Holford, (1979,1997), llevaron a cabo varias investigaciones a este respecto y compilan numerosas investigaciones desarrolladas sobre la problemática del P en ese país, mencionaron que la recuperación del P proveniente de los fertilizantes por los cultivos es sumamente baja en Andisoles, ya que estos suelos retienen aproximadamente 86.4% del P adicionado. En este sentido para cultivos anuales como maíz, frijol y hortalizas como la papa, que demandan altos contenidos de este elemento, señalan que se hace necesario el uso de compuestos fosfatados de alta solubilidad, pero para cultivos perennes, la residualidad de rocas fosfóricas en suelos ácidos es altamente benéfico.

Benítez, (1983), en una evaluación durante 11 años en una estación experimental agrícola de Yurimagua, Perú, destaca la importancia de las fuentes de P provenientes de la roca fosfórica las cuales cuestan solo la tercera o quinta parte del costo de los superfosfatos, por lo que se pueden realizar ahorros importantes en el manejo del P en los suelos ácidos. En los experimentos de este último investigador conducidos en Ultisoles, probaron aplicaciones de 50, 100, 300 y 400 kg P₂O₅/ha en maíz, soya y arroz, con fuentes de RF y SFS, destacan en sus resultados que con la dosis de 100 kg P₂O₅/ha, cuando se fertiliza con SFS se encuentra en o cerca del nivel crítico: en cambio, cuando se usa RF el efecto residual está por encima del nivel crítico, además de que las fuentes fosfatadas de RF, aumentan el Ca intercambiable y generan un efecto neutralizante del Al cambiabile de los suelos ácidos.

A resultados similares han llegado también diversos investigadores que han llevado a cabo trabajos de investigación en líneas similares, Smith y Sánchez, (1982, 1983), Gichuru y Sánchez, (1988). Más recientemente, Fonseca, (1998) y Alfaro, (1998), probando dos dosis, dos fuentes y dos formas de aplicación en Ultisoles y Andisoles de Costa Rica cultivados con café, encontraron una acumulación significativa de P en el suelo luego de 4 y 6 años de aplicación, así como interacciones significativas a la aplicación de SFT con respecto a la RF, reconociendo que son muchos los factores que intervienen en la solubilización de la roca fosfatada, siendo más efectiva en suelos muy ácidos, deficientes en P y que en esas condiciones es tan efectiva como el SFT. Montenegro y Zapata, (2002); Covarrubias *et al.*, (2005), señalaron también que para generar una recomendación válida de fertilización fosfatada es necesario conocer la dinámica del P en el suelo y su eficiencia agronómica.

En cuanto a la curva de absorción obtenida las diferentes épocas, en el presente experimento, (figura 58), y los resultados altos de las medias obtenidas en julio y septiembre, Carvajal, (1984), en un amplia revisión sobre este tema, destaca el hecho de que durante el periodo lluvioso tiene lugar una absorción más o menos alta y simultánea de N, P, K, Ca y Mg, así mismo, señala, en experimentos conducidos durante seis años, por el mismo autor, en suelos de Andisol de Costa Rica, que existe un efecto residual importante de P.

Finalmente en cuanto al abono orgánico, que se suministró en ese experimento como estiércol de caballo, Carvajal, (1984), señaló que su empleo en plantaciones de café

es particularmente ventajoso en suelos erodados y poco fértiles, y que en los suelos fértiles no se observa respuesta. De acuerdo a lo anterior, el suelo usado en el presente experimento, presenta porcentajes de materia orgánica muy alto (9.8%). por lo que se puede afirmar en este caso, que no es muy necesario el uso de abonos orgánicos y en caso de usarlos, deberán de incorporarse en mayores proporciones a las usadas en este experimento (5 kg/cafeto) y que son mejores si se complementan con fertilizantes.

6.3. CONCENTRACIÓN DE P EN HOJAS DE CAFÉ

Se evaluaron los cambios en la concentración de P foliar en café (*Coffea arabica var catuai*), en muestras colectadas durante cuatro épocas del año (mayo, julio, septiembre y diciembre) y en cinco años de experimentación en campo.

Al inicio del experimento, las cantidades de P foliar para el testigo eran de sólo 0.09 % (cuadro 37). Estos valores son muy bajos, lo que significa una clara deficiencia de este elemento en estos suelos y a nivel foliar. Varios investigadores como Muller, (1959), señalan que el promedio del P foliar en hojas de café, es del 0.15% al 0.2%, y cita que contenidos menores del 0.12% hay deficiencias de este elemento en cualquier planta, siendo el nivel crítico del 0.1 a 0.08%. Mongue, (1999), cita como niveles críticos en el nivel foliar del cafeto un intervalo de 0.15 a 0.35%, siendo esta última cifra un nivel bastante alto.

En el cuadro 36, se observa el resultado del análisis de varianza donde la significancia estadística es sumamente alta (0.0006%), lo que mostró el efecto de los tratamientos sobre los parámetros de estudio, como altamente significativo.

Cuadro 36. Análisis de varianza

Fuente de variación	DF	S.C.	C.M.	F
Model	95	0.50516130	0.005317	1.8095
Error	144	0.42316320	0.002939	Prob > F
C. Total	239	0.92832450		0.0006

La gran deficiencia en fosfatos en los suelos utilizados se refleja en los escasos niveles absorbidos de éste elemento a nivel foliar obtenidos en los testigos y en los tratamientos que no contenían P o con las dosis bajas, cuyas medias llevaron a solo 0.09 (mg g^{-1}) para el testigo, de 0.1 (mg g^{-1}) para el 18-00-12, 0.11 (mg g^{-1}) para el 18-06-12 RF, 0.13 (mg g^{-1}) para el 18-06-12 SFT. En estas últimas dosis el efecto fue mejor con el tratamiento con SFT que con RF tal como se observa en el cuadro 37, sin embargo, estos niveles son considerados bajos de acuerdo a Muller, (1959) y Mongue, (1999).

En el presente experimento, la respuesta a las aplicaciones ascendentes de P_2O_5 ya sea en forma de SFT y de RF, llevaron a aumentos crecientes en el nivel de P foliar. Al reducirse las aplicaciones de P en los tratamientos intermedios, los suelos que recibieron dosis 18-16-12 mostraron pocas diferencias y fluctuaron entre 0.16 (mg g^{-1}) y 0.15 (mg g^{-1}) para los tratamientos con RF y SFT respectivamente, y nuevamente los tratamientos con roca fosfórica elevan ligeramente el contenido de P foliar. En tanto, las aplicaciones 18-12-12, también elevaron los contenidos, con respecto al testigo, con valores de 0.15 (mg g^{-1}) para los tratamientos con SFT y 0.13 (mg g^{-1}) con la RF, estadísticamente sus medias mostraron pocas diferencias entre estos tratamientos.

Se observa que los tratamientos que estadísticamente dieron los valores más altos fueron los de 18-20-12, tanto con RF como con SFT elevando las concentraciones del contenido foliar a valores altos con 0.20 (mg g⁻¹) y 0.17 (mg g⁻¹) respectivamente. Con base en el análisis estadístico, estos resultados son equivalentes. En el presente experimento, la RF aunque solo contiene alrededor del 20% de P soluble, produjo un mayor efecto residual en el suelo al final del experimento, lo cual se reflejó en una mejor disponibilidad para la planta que el SFT, lo cual señalan investigadores como Pastrana, (1979), Etchevers y Fernández, (1981), en México; Alegre *et al.*, (1991), en investigaciones en Perú; Córdoba, (1991), en Ecuador; Reyes, (1991), Herrera, (1994), Rivero *et al.*, (2001); en Venezuela, en el sentido de que para los suelos volcánicos la RF representa una adecuada fuente de P para suelos altamente fijadores de P, ya que la roca fosfórica libera gradualmente el P que requiere la planta por lo que en cultivos perennes como el café en estos suelos, es una buena alternativa.

No obstante, la fuente fosfatada soluble usada (SFT), alcanzó a llevar a concentraciones suficientes de P foliar, pero al final del experimento la RF aventajó al ST. Por ésta razón, las fuentes solubles son ampliamente utilizadas en cultivos anuales tal como señalan Carvajal, (1972, 1984); Valencia, (1977, 1998, 1999); Coste, (1978); Guridi *et al.*, (1985); Fixen, (1994); Monge, (1999).

Para mostrar el efecto de los tratamientos sobre el contenido foliar, los resultados se exponen en la figura 63 y en el cuadro 37, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en P a nivel foliar.

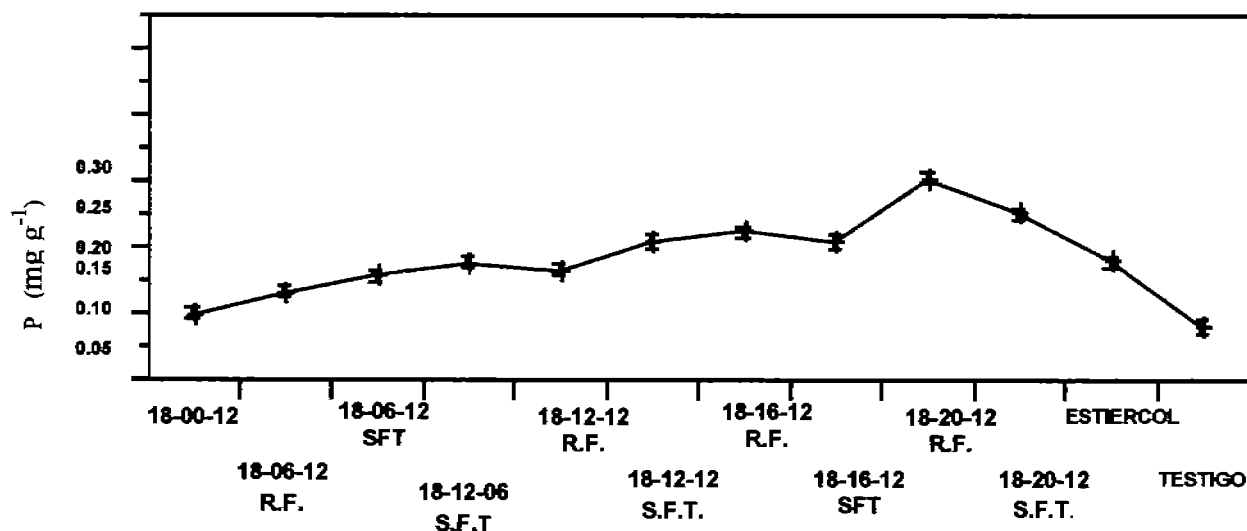


Figura 63. Efecto de los tratamientos en el contenido de P foliar en plantas de café

En esta figura se puede observar el comportamiento de los tratamientos sobre el contenido foliar, donde se resalta que los niveles de suficiencia a nivel foliar se logran con dosis altas a medias de P, lo cual en este experimento se logró con las dosis de

18-20-12 y 18-16-12, siendo la RF al final de los experimentos el que logró el mejor nivel (0.20 mg g^{-1}), aunque el SFT logró niveles también altos (0.17 mg g^{-1}).

Cuadro 37. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P foliar en plantas de café

Tratamiento							Cuadrado de las medias P (mg g^{-1})
18-20-12 R.F.	A						0.20200000
18-20-12 S.T.		B					0.17550000
18-16-12 R.F.			C				0.16190000
18-12-12 S.T.			C				0.15400000
18-16-12 S.T.			C				0.15400000
ESTIÉRCOL				D			0.13950000
18-12-06 S.T.				D	E		0.13850000
18-12-12 R.F.				D	E		0.13300000
18-06-12 S.T.					E		0.12790000
18-06-12 R.F.						F	0.11585000
18-00-12 .						G	0.09942500
TESTIGO						G	0.09030000

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

Con relación al tratamiento con estiércol de caballo, las medias muestran sólo 0.13 mg g^{-1} . Es posible que la cantidad aplicada de 5 kg por cafeto (10 Mg/ha), no haya sido suficiente para elevar los contenidos de P en el nivel foliar. Al respecto, Uribe-Henao *et al.*, (1983); Gallardo-Lara *et al.*, (1988); Monge, (1999); Fischersworing y Roßkamp, (2001); Rivero *et al.*, (2001); Soto, (2002), señalan que no todos los estiércoles son altamente eficientes y el de caballo usado es el de menor contenido en P, aunque todos ellos están de acuerdo en la importancia de los abonos orgánicos para el cultivo de café. El nivel foliar obtenido con el tratamiento de estiércol en este experimento se comportó de forma similar a los tratamientos con bajos contenidos de P, como el 18-06-12 y el 18-12-12, sin embargo fue mejor que el testigo, pero menor que con los tratamientos con altas dosis de P (cuadro 37 y figura 63).

Finalmente las altas cantidades de P empleadas en los tratamientos, a nivel foliar fueron significativamente positivos. Esto se muestra en el cuadro 36, donde el testigo al final de los 5 años de tratamiento continuó con bajos contenidos foliares de 0.09 mg g^{-1} de P. Los tratamientos que no llevaron P como el 18-00-12 presentaron valores pobres de P foliar (0.099 mg g^{-1}), mientras que las dosis medias y altas fueron elevando los contenidos de altos a muy altos de P a nivel foliar, hasta llegar a valores de 0.20 mg g^{-1} considerados éstos suficientes para una adecuada nutrición fosfatada (Muller, 1959; Valencia, 1968, 1984; Carvajal, 1984; Mongue, 1999).

Los resultados anteriores muestran una clara deficiencia de P en estos suelos y a medida que se incrementaron las aplicaciones de P, con dosis medias y altas, mejoró la concentración a nivel foliar de este elemento. Según varios autores como Muller, (1959); Loué, (1962); Rajú, (1969); Chebadi *et al.*, (1970); Parra, (1972); Carvajal, (1984); Guridi *et al.*, (1984); Valencia, (1984); Ramírez *et al.*, (1999), el mantenimiento de valores altos ó suficientes de P, junto con el N y el K, son indispensables para cubrir satisfactoriamente todas las etapas fisiológicas como crecimiento, floración, fructificación y obtener cosechas adecuadas de café tanto en cantidad como en calidad.

6.3.1 VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN HOJAS DE CAFÉ

La prueba del efecto por época (mayo, julio, septiembre y diciembre) fue altamente significativa y los resultados se muestran en el cuadro 37, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en el contenido de P a nivel foliar.

En el cuadro 35 y en la figura 37, se presenta la significancia del comportamiento del P a nivel foliar en cuatro épocas (mayo, julio, septiembre y diciembre), se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en P.

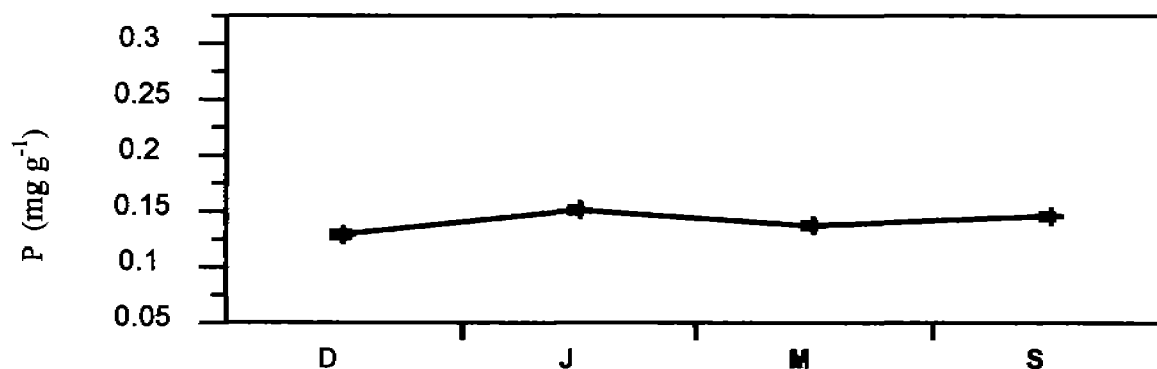


Figura 64. Comportamiento del P a nivel foliar durante las épocas de muestreo por año

El comportamiento de los niveles de P a nivel foliar en las diferentes épocas de aplicación se muestra en el cuadro 38 y figura 64. Se encontró un menor nivel de P foliar en mayo (0.13 mg g⁻¹) y el valor más alto se presenta en julio (0.15 mg g⁻¹), que junto con la época de septiembre (0.14 mg g⁻¹), seguido por el valor de diciembre (0.14 mg g⁻¹), coinciden con los periodos de mayor precipitación en la zona, que va de junio a noviembre, etapa muy importante desde el punto fisiológico para la planta, como es: 1) floración, 2) luego el llenado de la cereza de café, 3) fructificación y cosecha, por lo que requiere tener una disponibilidad del P a nivel foliar para todos los procesos energéticos durante el crecimiento, maduración y floración del café que derivan del P, tal como lo cita Rajú,

(1969); Chebadi *et al.*, (1970); Parra, (1972); Carvajal, (1984); Valencia, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Ramírez *et al.*, (1999), quienes han puesto de relieve que la máxima absorción de P coincidió con el lapso de mayor crecimiento en la época de lluvia, además de señalar que existe un sinergismo bastante conocido de N-P, por lo que cualquier insuficiencia de P, tendrá repercusiones en la absorción de N. En mayo el bajo contenido reflejan la época de menor humedad y comienzo de la época lluviosa y la primera época en que se muestreó el material foliar antes de la aplicación de los tratamientos.

Aunque la variación de las medias de los niveles de P foliar entre julio, septiembre y diciembre (de 0.15 mg g⁻¹, 0.14 mg g⁻¹ y 0.12 mg g⁻¹) no son muy marcadas, reflejan los patrones estacionales relativamente distintos en la época de lluvias e influyen desde el punto de vista fisiológico, por lo que como lo señalan algunos autores, el aporte de P es fundamental para el mantenimiento y distribución del P a nivel foliar, los cuales controlarán la suficiencia o insuficiencia de este elemento para la disponibilidad de sus procesos metabólicos, además de la sinergia con el N, tal como lo citan Loué, (1962); Parra, (1972); Carvajal, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Valencia *et al.*, (1998); Ramírez *et al.*, (1999).

Las concentraciones de P en las hojas tendió a decrecer en mayo y diciembre (0.13 mg g⁻¹ y 0.12 mg g⁻¹) y a aumentar en julio y septiembre (0.15 mg g⁻¹ y 0.14 mg g⁻¹), época de mayor precipitación, crecimiento y absorción, por lo que fisiológicamente la planta utilizará al máximo su capacidad de disponibilidad nutritiva para producir biomasa y buena fructificación (Moraes, 1979; Pacheco y Carvajal, 1978, 1984).

Cuadro 38. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P foliar en las diferentes épocas de aplicación

Tratamiento				Cuadrado de las medias P(mg g ⁻¹)
J	A			0.15017500
S	A			0.14655000
M		B		0.13806667
D			C	0.12916667

Nota: M (mayo), D (diciembre), S (septiembre), J (julio) son las épocas de aplicación de los tratamientos en el año.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

En resumen, luego de cinco años de aplicaciones de P₂O₅ tanto la aplicación de altas dosis de SFT como con la RF, aumentaron significativamente en todos los casos el contenido de P foliar, el estiércol fue de respuesta intermedia, mientras que el testigo mostró deficiencias, por lo que se observó que hay una respuesta positiva a nivel foliar con la aplicación de P, lo que puede influir significativamente en la productividad de los cafetales.

6.3.2 EFECTOS DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN HOJAS DE CAFÉ

En el cuadro 36, se observa que el resultado del análisis de varianza es significativo y en el cuadro 39, se observa la prueba de Tukey donde las diferencias entre tratamientos son muy significativas.

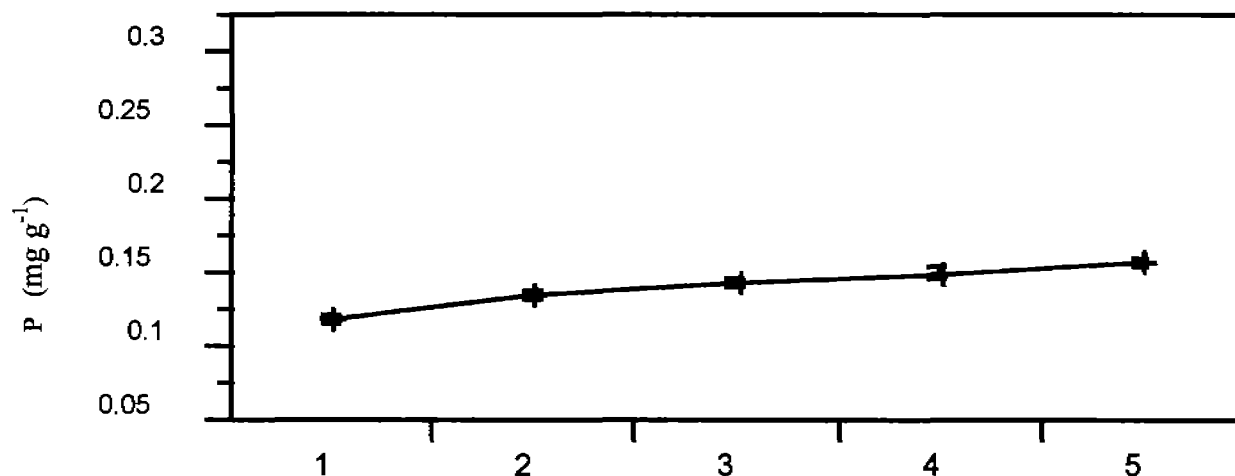


Figura 65. Efecto del contenido de P a nivel foliar en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo

Cuadro 39. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P a nivel foliar a través de los cinco años de aplicación

Tratamientos						Cuadrado de las medias P (mg g ⁻¹)
5	A					0.15789583
4		B				0.14979167
3			C			0.14277083
2				D		0.13547917
1					E	0.11901042

Nota: 1, 2, 3, 4 y 5 son los años de los experimentos.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

En la figura 65, Se muestran los valores a nivel foliar durante los cinco años del experimento.

Tal como se observa en la figura 66, durante los cinco años que duró el experimento, los niveles de deficiencia a nivel foliar se observaron en todos los años y épocas en el testigo y en los tratamientos con bajas dosis de P. Los mejores tratamientos fueron los de las fórmulas 18-20-12, tanto con el SFT como con el de RF, notándose también que en el comportamiento en las cuatro épocas del año, los valores encontrados en julio eran los más altos.

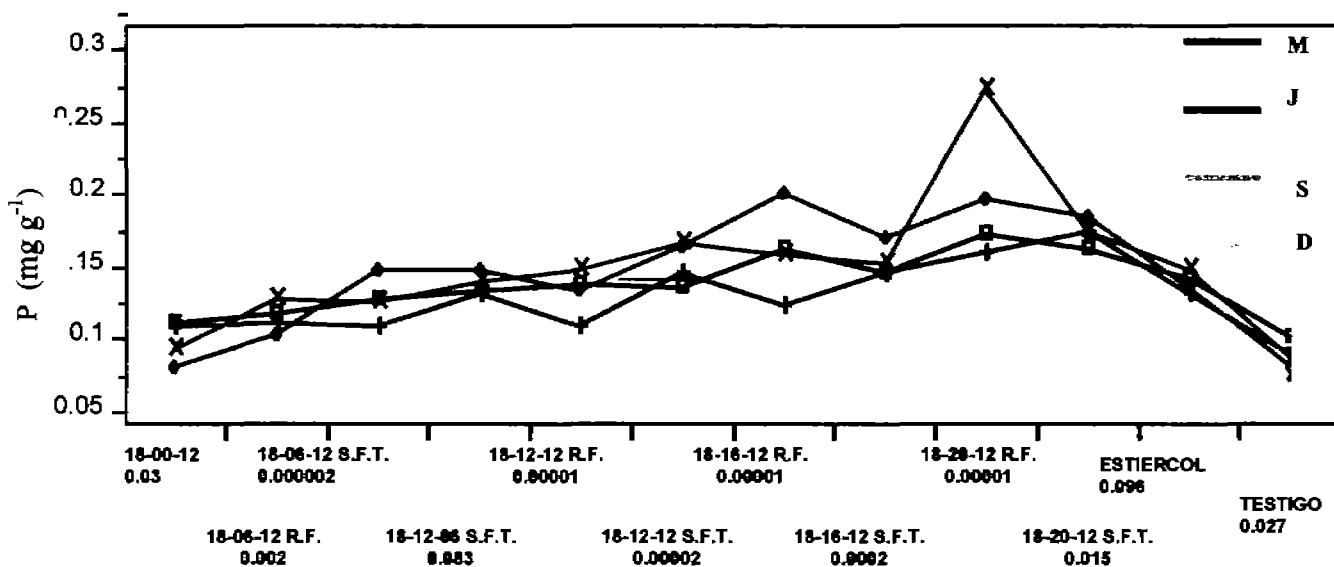


Figura 66. Contenido del P foliar por épocas (mayo, julio, septiembre y diciembre) y los tratamientos. Abajo de cada tratamiento se señala el nivel de significancia

Se observa que los tratamientos 18-12-12, 18-16-12, tanto con RF como con el SFT, fueron altamente significativos (0.00001), mientras que el tratamiento testigo, no fue significativo al nivel de 0.01 (0.027), como tampoco lo fue el 18-00-12 (0.03). Los tratamientos con bajas dosis de P 18-06-12 RF (0.03), 18-06-12 SFT (0.35), y el estiércol (0.096) manifestaron suficiente nivel de significación. El tratamiento con mejor nivel foliar de P fue el 18-20-12 RF y fue altamente significativo (0.00001), éste fue mejor que el 18-20-12 ST (0.015). Puede observarse que en los cinco años la RF tiene un buen efecto residual en suelo que se reflejara en el nivel foliar. Esto ha sido también observado en algunos experimentos conducidos con el uso de roca fosfórica a nivel de invernadero (Fernández, 1981; Herrera *et al.*, 1994).

Por lo que se refiere al tratamiento con estiércol, la escasa respuesta en el nivel foliar, está de acuerdo con lo citado por algunos investigadores, como Monroy *et al.*, (1981); Uribe y Henao, (1981); Carvajal, (1984); Gallardo *et al.*, (1988); Rivero *et al.*, (2001); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002); Hirzel *et al.*, (2004), quienes señalaron que

su empleo en plantaciones de café es particularmente ventajoso en suelos erodados y poco fértiles, y que en los suelos fértiles no se observa respuesta y que aún cuando los estiércoles mejoran las condiciones de fertilidad en los suelos, para algunos estiércoles bajos en P, como es el caso del estiércol de caballo utilizado en el presente experimento, es necesario adicionar la fuente fosfatada (fertilizante inorgánico) para un mejor efecto y resultado sobre la nutrición de las plantas, por lo que en el presente experimento no fue significativo, ya que el suelo empleado tiene un alto porcentaje de M.O (9.8%).

Los tratamientos testigo, muestran las menores concentraciones de P foliar, el cual generará otros desequilibrios fisiológicos en la planta de café, principalmente con N, tal como lo señala Chebadi *et al.*, (1970); Aduayi, (1972); Parra, (1972); Amorin, (1973); Haarer, (1977); Coste, (1978); Malavolta, (1981); Carvajal, (1984); Valencia *et al.*, (1984); Monge, (1999).

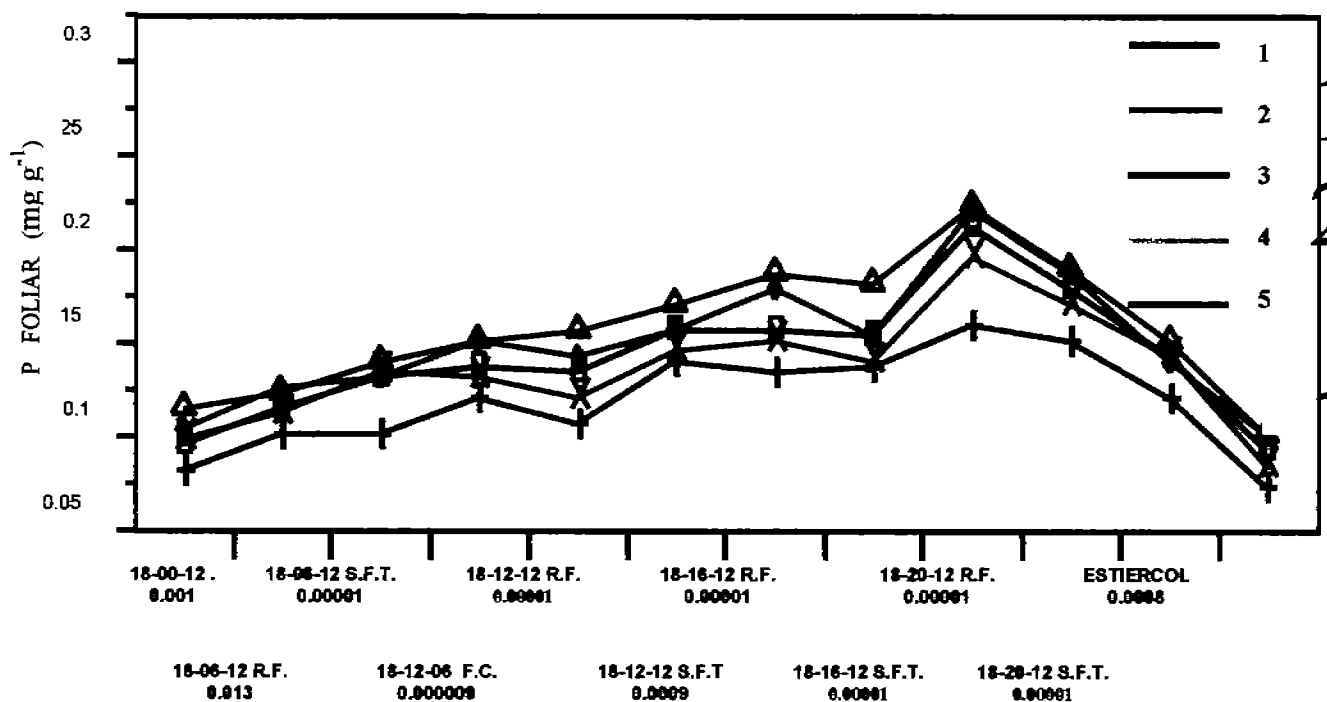


Figura 67. Contenido de P a nivel foliar durante cinco años de observación. Abajo de cada tratamiento se señala el nivel de significancia

Se puede observar que durante los cinco años los mejores tratamientos fueron los que contienen las dosis más altas de P, 18-20-12, altamente significativos (0.00001), tanto con RF, como los de SFT, notándose que en el último año, se alcanza la mayor concentración de P foliar, lograda a través de la RF, seguida por el SFT.

Los tratamientos con dosis intermedias 18-16-12 tanto con RF como con SFT fueron también altamente significativas al (0.0001) respectivamente, seguidas por los tratamientos que recibieron los dosis 18-12-06, (0.00001) con RF y SFT. Los tratamientos con dosis 18-06-12 SFT y RF, también son significativas, en tanto que las dosis bajas 18-00-12 (0.001), 18-06-12 RF (0.013) y el testigo no fueron significativas (0.0046).

En la Figura 67 y 68, también puede observarse la evolución de los tratamientos en los 5 años del experimento, se observan los menores contenidos en el año 1, aumentando paulatinamente a través de los siguientes años, hasta el año 5, en el cual se tiene el mayor nivel de P encontrado con la aplicación de las mayores dosis de P, 18-20-12 (0.00001), tanto con RF, como con el SFT.

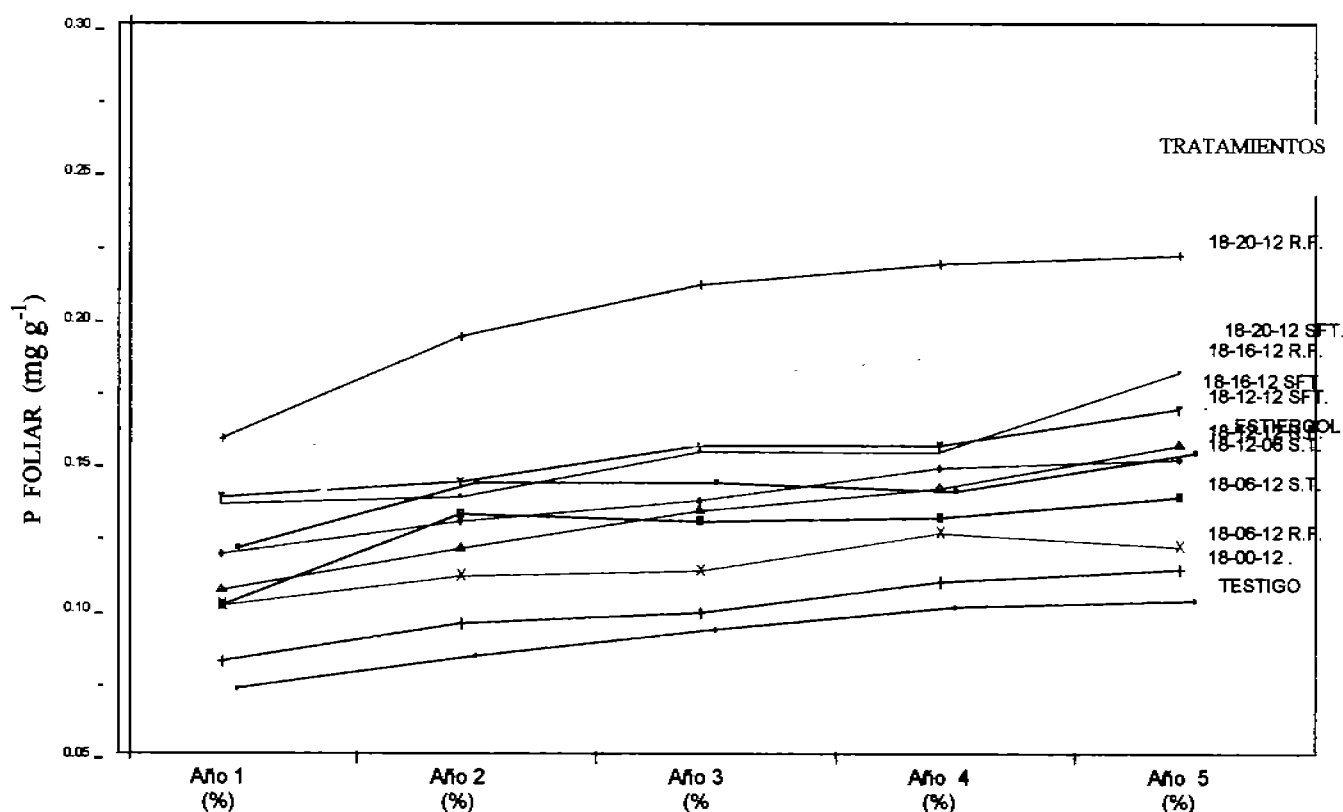


Figura 68. Respuesta global de los tratamientos durante los cinco años de aplicación en el nivel foliar

En la figura 68, se muestran los efectos globales y evolución de las medias de los tratamientos NPK, cuyas fuente de P fueron superfosfato triple (SFT) y roca fosfórica (RF), aplicación de estiércol y los testigos, con las dosis mostradas en el cuadro 36, durante los cinco años del experimento, los cuales elevaron paulatinamente el nivel de P foliar a través de los siguientes años, hasta lograr la máxima concentración en el año 5. En la figura 68, se observa que los mejores tratamientos fueron los que contienen las dosis de P, 18-20-12, y particularmente los que contienen las más elevadas aplicaciones de RF, seguido por el SFT, observándose que en el último año, se alcanza la mayor concentración de P, logrado con la RF seguida por el SFT.

Los hechos anteriores, señalan que al igual que cualquier otra planta, el café necesita para su desarrollo óptimo de cierto número de nutrimentos esenciales, en cantidad suficiente y en una combinación balanceada si se quieren tener altos rendimientos en cantidad y calidad. Si la cantidad de uno de estos elementos es relativamente baja en el medio en el cual crece, se afectan su vigor, su desarrollo y especialmente su productividad, como consecuencia de una deficiencia mineral, y esto se reflejará en las concentraciones foliares, tal como lo señalan Rajú *et al.*, (1969); Amorin *et al.*, (1973); Haarer, (1977); Licona, (1979); Mestre-Mestre *et al.*, (1980); Malavolta *et al.*, (1981); Uribe-Henao, (1983); Carvajal, (1984); Muñoz, (1984); Valencia, (1984); Pérez *et al.*, (1992); Monge, (1999); Ramírez *et al.*, (1999).

Con respecto a otros trabajos de investigación similares al presente experimento para realizar recomendaciones en abonamiento del café basadas en resultados del análisis foliar y del grano, Valencia y Arcila, (1977), señalaron después de haber estudiado el comportamiento de fórmulas fertilizantes en seis suelos cafetaleros de Colombia, que las aplicaciones deben considerar la cantidad de nutrimentos que existen en el suelo, ya que éstos los contienen en diversas cantidades y en condiciones químicas a veces no fácilmente asimilables, como es el caso del P en el suelo usado en el presente experimento.

Por ello varios investigadores como Carvajal, (1963); Chebadi, (1970); Parra, (1972); Jiménez, (1980); Hiroce, (1981); Noriega *et al.*, (1981); Snoeck, (1984); Valencia, (1984); Guridi *et al.*, (1985), le dan una importancia central al análisis foliar para conocer la correlación suelo-planta-productividad, lo que permite tener información sobre la cantidad de nutrimentos que se encuentran en el suelo, y en la planta de café, con el objetivo de valorar si existen deficiencia o suficiencia de un elemento y poder hacer las correcciones de fertilidad antes de que la planta entre en un estrés nutritivo.

Tal como lo citan varias investigaciones (López, 1969; Coste, 1978; Malavolta, 1981; Ramos, 1982; Bravo *et al.*, 1984; Ramos y Aguilera, 1984; Guridi *et al.*, 1985; Fixen *et al.*, 1990; Fixen, 1994; Alfaro *et al.*, 1998; Chavarria *et al.*, 1999; Valencia, 1999; Fernández *et al.*, 2001; Doberman *et al.*, 2002), el P es un elemento esencial para el desarrollo de las plantas, aunque su contenido sea menor que el N y el K. Muller, (1959) y Mongue, (1999), señalan que el promedio de las hojas es del 0.15% al 0.2% e inclusive 0.35%, siendo estos dos últimos valores nivel bastante altos. Con contenidos menores del 0.12% hay deficiencias de este elemento, siendo el nivel crítico del 0.1 al 0.08% (Muller 1959). Mencionan también que la variación en el contenido de P durante el curso del año no es tan grande como en el caso de otros elementos y la curva es muy semejante a la de N.

Con base en estos porcentajes y en los resultados del cuadro 39 de Tukey, las concentraciones foliares mostradas en las medias de los tratamientos testigo (0.09 mg g^{-1}), estiércol de caballo, (0.13 mg g^{-1}), 18-00-12 (0.09 mg g^{-1}), 18-06-12 RF (0.11 mg g^{-1}), 18-06-12 SFT (0.12 mg g^{-1}), 18-12-06 (0.13 mg g^{-1}), y 18-12-12 RF (0.13 mg g^{-1}), presentan contenidos bajos que se relacionan con el comportamiento del suelo y se reflejará en una deficiencia en el nivel foliar en la planta de café. Esta situación ha sido observada por varios investigadores como Aduayi, (1972); Parra, (1972); Uribe-Henao, (1983); Carvajal, (1984); Vinasco-Ossa *et al.*, (1984); Valencia, (1998); Ramírez, (1999).

En el presente experimento, el efecto de los tratamientos en el nivel foliar, tuvo su máximo efecto con la RF seguida por el SFT: 18-20-12 RF (0.20 mg g^{-1}), 18-20-12 SFT (0.17 mg g^{-1}), 18-16-12 RF (0.16 mg g^{-1}), 18-16-12 SFT (0.15 mg g^{-1}), cuyos niveles son suficientes junto con los otros niveles NK para todas las funciones fisiológicas que requiere la planta de café (Coste, 1978; Uribe-Henao, 1983; Carvajal, 1984; Guridi *et al.*, 1984; Muñoz, 1984; Inmecafé, 1990; Fixen, 1994; Valencia 1999).

El efecto altamente significativo del P sobre el nivel foliar, coincide con investigaciones realizadas en el cultivo del café, particularmente en países de Centro y Sudamérica sobre suelos volcánicos, así lo citan varios autores como, Gamboa *et al.*, (1976); Valencia *et al.*, (1977); Moraes *et al.*, (1979); Hiraci, (1981); Bravo, (1984); Carvajal, (1984); Muñoz, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Canessa *et al.*, (1987); Chavarria *et al.*, (1999); Valencia, (1999), los cuales han observado que al aumentar la capacidad de retención de fosfatos y disminuir los contenidos de P disponible en el suelo, el contenido foliar disminuye y consecuentemente las cantidades de P requeridas para llegar al ámbito adecuado en plantas cultivadas deben ser mayores.

Los tratamientos elevados de P que fueron necesarias para un mejor nivel foliar son consecuencia de la fijación de P en los suelos derivados de cenizas volcánicas. Así lo han confirmado las investigaciones reportadas en Fassbender, (1966, 1968, 1969, 1975); Fassbender *et al.*, (1967, 1968, 1969, 1978, 1987); Martini, (1969); Bravo, (1974); Hawaii, (1980); Ramos, (1982); Ramos y Aguilera, (1984); Quantin, (1986); Canesa *et al.*, (1987); Sánchez *et al.*, (1990); Fixen, (1994); Alvarado *et al.*, (2001); Fernández, (2001); Zheng, (2002); Saber *et al.*, (2003); Toor *et al.*, (2004); Vázquez *et al.*, (2004); Zhang *et al.*, (2004); Giesler *et al.*, (2005); Torber *et al.*, (2005), por lo que se ha puesto especial importancia a éste elemento, pues es sabido que las condiciones del suelo tienen influencia decisiva en la disponibilidad y aprovechamiento del P, como sucede en los suelos estudiados, por lo que se torna crítico cuando las cosechas son abundantes y la cantidad de P es insuficiente.

Algunos de estos autores como Valencia *et al.*, (1977), llevó a cabo un experimento probando dosis NPK, reconociendo la influencia en la composición mineral de las hojas de cafeto, el comportamiento estacional de éstos y la influencia del NP. Este mismo autor señaló la necesidad de realizar recomendaciones para el abonamiento del cafeto basadas en resultados del análisis foliar y del grano. Con respecto a la influencia del P, Raju & Subramanian, (1969), encontraron que los contenidos foliares de N y P reflejan satisfactoriamente el nivel foliar y los rendimientos del cafeto, por lo que el mantenimiento de niveles óptimos son necesarios para una buena producción. Señalaron también que el N

y K, son los elementos que más se asocian a la cantidad de la producción, pero que la calidad de la bebida es perjudicada por la falta de P en la fertilización.

En nuestro país, antes que desapareciera el Inmecafé que tenía su sede en Xalapa, Ver., se realizaron varios experimentos a fin de encontrar las fórmulas y dosis adecuadas NPK, sin embargo casi todos los trabajos fueron llevados a cabo en la zona de Veracruz, por lo que los resultados no siempre fueron extrapolables a otras zonas cafetaleras del país, como en la zona del presente experimento.

En cuanto al efecto del abonamiento orgánico, existen muy distintas opiniones sobre su efecto, pero lo que señalan varios investigadores como Salas, (2001); Soto *et al.*, (2002); Hirzel *et al.*, (2004), es que se requiere de un balance de P ó adición de P, ya que éstos suelos contienen escasos contenidos de P, el cual puede tomarse no aprovechable en suelos altamente fijadores de P. Señalaron en general que los abonos orgánicos son más efectivos cuando se combinan con un suplemento de N, P y K, y que son especialmente importantes en suelos con baja fertilidad.

Finalmente varios autores como Haarer, (1977); Coste, (1978); Uribe-Henao, (1983); Carvajal, (1984); Guridi, (1985); Rena *et al.*, (1986); Fixen, (1994); Ramírez *et al.*, (1999); Valencia, (1999), señalaron que el P juega un papel de mucho relieve en el amarre (retención o fijación) de los frutos, así como en su desarrollo, y que su deficiencia se observa claramente en el nivel foliar y en la calidad de la cereza de café. Así mismo, afirmaron que las deficiencias de P, K y Ca, interrumpen el metabolismo de N, pero su efecto es mayor sobre la absorción de nitratos, por lo que resulta importante considerar los niveles foliares de los principales elementos.

6.4. CONCENTRACIÓN DE P EN PULPA DE CAFÉ

Se evaluaron los cambios en la concentración de P en la pulpa de café (*Coffea arabica var catuai*), en muestras obtenidas por la recolecta durante dos épocas de cosecha (septiembre y diciembre) y en cinco años de experimentación en campo.

La pulpa es la parte externa, de pigmentación roja o amarilla, del fruto maduro del café, considerada como el subproducto del café más importante. Representa el epicarpio y parte del mesocarpio del fruto y constituye entre el 40 y 43% del peso del fruto, de acuerdo a varios autores (Calle, 1977; Haarer, 1977; Coste, 1978; Carvajal, 1984). Se obtiene una vez que la cereza de café pasa por el despulpado mecánico en el beneficio del café.

Se la ha concedido una enorme importancia a este subproducto, desde varios puntos de vista. Posee un alto contenido de nutrimentos, por lo que su tratamiento y uso para abono orgánico es cada vez más frecuente en el ámbito de la cafeticultura orgánica, dado que los volúmenes que se producen en los beneficios de café son muy considerables (Monroy *et al.*, 1981; Uribe-Henao, 1983; Gallardo *et al.*, 1988; Monge, 1999; Rivero *et al.*, 2001; Salas *et al.*, 2001; Soto *et al.*, 2002; Salas *et al.*, 2003).

A diferencia del café oro, que es el producto comercializable del cultivo, cuando la pulpa no se le da una utilidad inmediata, pasa a formar parte de las problemáticas ambientales en las zonas cafetaleras, ya que es arrojado en grandes volúmenes a los ríos y arroyos.

Al inicio del experimento, las cantidades de P en la pulpa de café para el testigo eran de sólo 0.074 mg g⁻¹ (cuadro 41). Estos valores son muy bajos, lo que significa una deficiencia de este elemento. Diversos autores han dado cifras sobre los contenidos minerales en la pulpa de café y se citan como valores medios de nutrimentos al N 1.70%, P 0.20 %, K 1.06 %. (Jácome, 1980).

En el cuadro 40, se observa el resultado del análisis de varianza donde la significancia estadística es sumamente alta (0.0001%), lo que mostró el efecto de los tratamientos sobre los parámetros de estudio, como altamente significativo.

Cuadro 40. Análisis de varianza

Fuente de variación	DF	S.C.	C.M.	F
Model	71	0.21850697	0.003078	18.7490
Error	48	0.00787900	0.000164	Prob > F
C. Total	119	0.22638597		<.0001

La gran deficiencia en fosfatos de los suelos utilizados se refleja en los escasos niveles absorbidos de éste elemento por la pulpa de café. Las medias de los tratamientos

con dosis bajas de P, cuyas medias llevaron a solo 0.074 mg g⁻¹ para el testigo, 0.11 mg g⁻¹ para el 18-06-12 SFT, de 0.13 mg g⁻¹ para el 18-00-12, 0.14 mg g⁻¹ para el 18-12-06-12, 0.15 mg g⁻¹ para el 18-06-12 RF, 0.16 mg g⁻¹ para el 18-12-12 RF, 0.17 mg g⁻¹ para el 18-12-12 SFT. En estas dosis no se observó un efecto determinante por el efecto de la RF ó el SFT tal como se observa en el cuadro 40, aunque en los tratamientos con la fórmula 18-06-12 hubo un mejor efecto con la RF que con el SFT (0.11 mg g⁻¹ y 0.15 mg g⁻¹ respectivamente). Con la fórmula 18-12-12 el efecto fue ligeramente mejor con el SFT que con la RF (0.168 mg g⁻¹ y 0.171 mg g⁻¹ respectivamente)

En el presente experimento, la respuesta a las aplicaciones ascendentes de P₂O₅ ya sea en forma de SFT y de RF, llevaron a aumentos crecientes en el nivel del P en la pulpa de café. En los tratamientos intermedios, las medias de los suelos que recibieron dosis 18-16-12 mostraron pocas diferencias y fluctuaron entre 0.18 mg g⁻¹ y 0.17 mg g⁻¹ para los tratamientos con RF y SFT respectivamente, y nuevamente los tratamientos con roca fosfórica elevan ligeramente el contenido de P en la pulpa de café.

Se observa que los tratamientos que estadísticamente dieron los valores más altos fueron los de 18-20-12, tanto con RF como con SFT elevando las concentraciones de P en la pulpa en 0.24 mg g⁻¹ y 0.18 mg g⁻¹ respectivamente, claramente se observa un mejor nivel en los tratamientos con RF. Con base en el análisis estadístico, estos resultados son significativamente diferentes. Aquí el P de la RF (aunque solo contiene alrededor del 20% de P soluble), produjo con el tiempo un mayor efecto residual en el suelo y una mejor disponibilidad para la planta y los frutos que el SFT, lo cual sugiere una adecuada fuente de P para estos suelos en el largo plazo. Varios autores (Haarer, 1977; Coste, 1978; Licon, 1979; Malavolta, 1981; Bravo, 1984; Fixen, 1990; Alfaro *et al.*, 1998; Chavarría *et al.*, 1999; Ramírez *et al.*, 1999; Valencia, 1999), han puesto de relevancia, sobre la necesidad de un aporte suficiente de P junto al NK, así mismo otros investigadores (Fassbender, 1966, 1968, 1969, 1975; Fassbender *et al.*, 1967, 1968, 1969, 1978, 1987; Martini, 1969; Hawaii, 1980; Ramos, 1982; Ramos y Aguilera, 1984; Quantin, 1986; Sánchez *et al.*, 1990; Fixen, 1994; Fernández, 2001; Zheng, 2002; Saber *et al.*, 2003; Vázquez *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2004; Toor *et al.*, 2004; Giesler *et al.*, 2005; Torber *et al.*, 2005), han demostrado que en suelos altamente fijadores de P, la RF libera gradualmente el P que requiere la planta y que en cultivos perennes como café, es una buena alternativa.

Para mostrar el efecto de los tratamientos sobre la pulpa de café, los resultados se exponen en la figura 69 y en el cuadro 41, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en P.

En ésta figura se puede observar el comportamiento de los tratamientos sobre el contenido de P en la pulpa de café, donde se resalta que los niveles de suficiencia se logran con dosis altas a medias de P, lo cual en este experimento se logró con las dosis de 18-20-12, siendo la RF al final de los experimentos la que logró la mejor concentración (0.24 mg g⁻¹), aunque el SFT logró concentraciones también altos (0.18 mg g⁻¹), pero fueron significativamente diferentes.

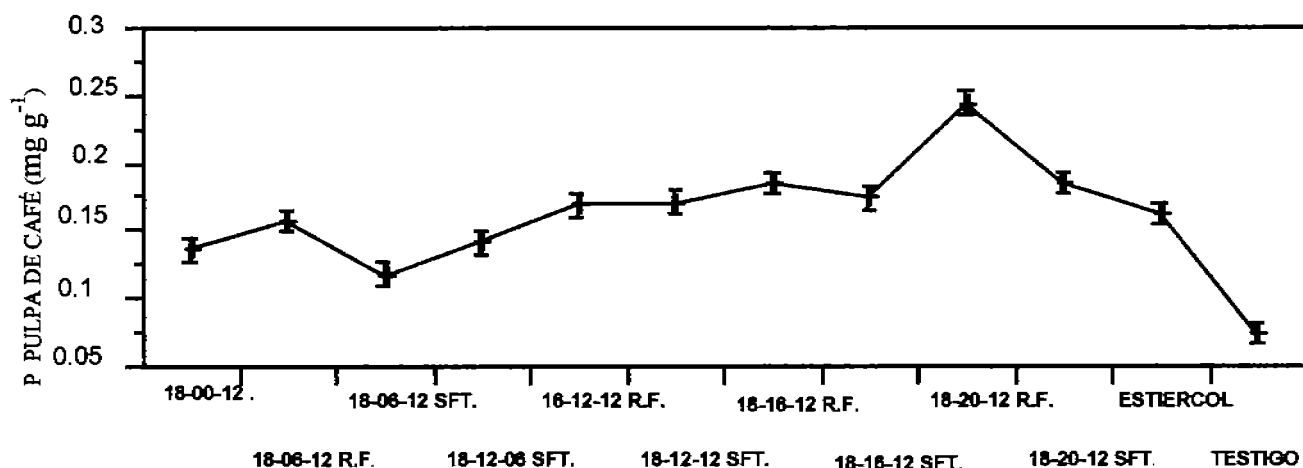


Figura 69. Gráfico de la prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pulpa de café.

Tabla 41. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pulpa de café

Tratamientos								Cuadrado de las Medias P (mg g ⁻¹)
18-20-12 R.F.	A							0.24400000
18-20-12 S.T.		B						0.18500000
18-16-12 R.F.		B						0.18500000
18-16-12 S.T.		B	C					0.17400000
18-12-12 S.T.		B	C					0.17100000
18-12-12 R.F.		B	C					0.16880000
ESTIERCOL			C					0.16200000
18-06-12 R.F.			C	D				0.15740000
18-12-06 FC.				D	E			0.14100000
18-00-12 .					E	F		0.13600000
18-06-12 S.F.T.						F		0.11800000
TESTIGO							G	0.07400000

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

Con relación al tratamiento con estiércol de caballo, las medias muestran sólo 0.16 mg g⁻¹. Es posible que la cantidad aplicada de 5 kg por cafeto (10 Mg/ha), no haya sido suficiente para elevar los contenidos de P en la pulpa de café. Al respecto, aunque diversos autores citan las propiedades importantes de los abonos orgánicos para el cultivo de café, es importante hacer notar que no todos los estiércoles son altamente eficientes y el de caballo usado es el de menor porcentaje de P (Uribe y Henao, 1981; Monroy *et al.*, 1981; Carvajal, 1984; Gallardo *et al.* 1988; Fischersworing y Roßkamp, 2001; Rivero *et al.*, 2001; Salas *et al.*, 2001; Soto *et al.*, 2002; Hirzel *et al.*, 2004). El nivel de P en la pulpa de café, obtenido con el tratamiento con estiércol en el experimento se comportó de forma similar a los tratamientos con bajos contenidos de P, como el 18-06-12, sin embargo fue mejor que el testigo, pero menor que con los tratamientos con altas dosis de P (cuadro 40 y figura 69).

Las altas cantidades de P empleadas en los tratamientos, fueron significativamente positivas. Esto se muestra en el cuadro 40, donde el testigo al final de los 5 años de tratamiento continuó con bajos contenidos foliares de 0.07 mg g⁻¹ de P. Los tratamientos que no llevaron P como el 18-00-12 presentaron valores pobres de P en la pulpa de café (0.13 mg g⁻¹), mientras que las dosis medias y altas elevaron los valores de P hasta 0.24 mg g⁻¹ considerados altos para la pulpa de café (Jácome, 1980).

Los resultados anteriores muestran una clara deficiencia de P en estos suelos, que se reflejó también en la concentración baja en la pulpa de café, éstas se incrementaron particularmente con dosis medias y altas. Según varios autores (Haarer, 1977; Coste, 1978; Uribe-Henao, 1983; Carvajal, 1984; Guridi *et al.*, 1985; Rena *et al.*, 1986; Fixen, 1994; Ramírez *et al.*, 1999; Valencia, 1999), el mantenimiento de valores altos o suficientes de P, junto con el N y el K, son indispensables para cubrir satisfactoriamente todas las etapas fisiológicas como crecimiento, floración, fructificación y obtener cosechas adecuadas de café.

6.4.1 VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P

En el presente experimento, los muestreos en cereza de café para obtener la pulpa, sólo se efectuaron en septiembre y diciembre, ya que son las épocas donde se realiza la recolección de café maduro. Los resultados se presentan en el cuadro 41 y figura 70. Se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en el contenido de P en la pulpa.

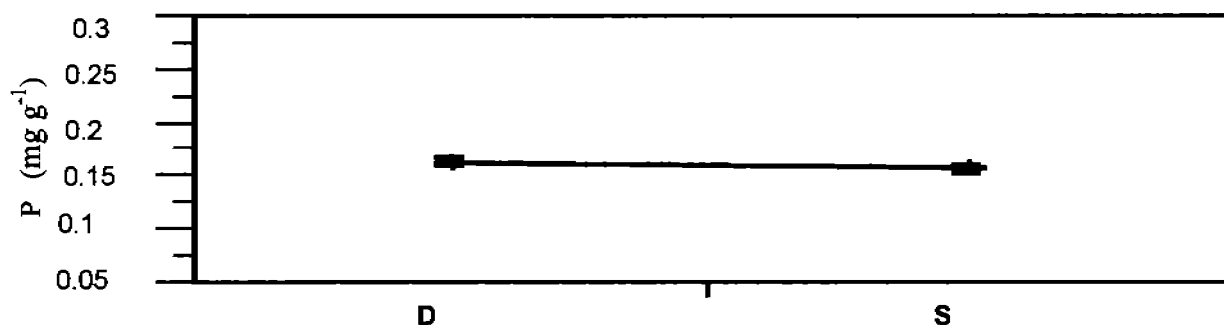


Figura 70. Comportamiento del contenido de P en pulpa de café durante dos épocas de corte (septiembre y diciembre)

El comportamiento de las concentraciones de P en la pulpa de café en las diferentes épocas (entre septiembre y diciembre) de 0.156 mg g^{-1} y 0.163 mg g^{-1} , (fig. 70), no son muy marcadas, pero muestran los patrones estacionales relativamente distintos en la época de lluvias que influyen desde el punto de vista fisiológico en la fructificación y maduración del fruto, y se refleja en el contenido de pulpa. El P es fundamental en el mantenimiento del equilibrio fisiológico, en todo el proceso energético del crecimiento del fruto, ya que una insuficiencia de P, creará un desequilibrio nutritivo que se reflejará en una mala fructificación y posiblemente disminución en la calidad de la cosecha, ya que afectará sus procesos metabólicos, tal como lo señalan Haarer, (1977); Coste, (1978); Uribe-Henao, (1983); Carvajal, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Rena *et al.*, (1986); Fixen, (1994); Ramírez *et al.*, (1999); Valencia, (1999).

6.4.2 EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN HOJAS DE CAFÉ

En el cuadro 42 se observa la prueba de Tukey donde las diferencias entre tratamientos son muy significativas y en la figura 70 se observa el comportamiento de P en las dos épocas de muestreo.

Cuadro 42. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pulpa de café a través en cinco años de aplicación.

Años de aplicación de tratamientos				Cuadrado de las medias P(mg g ⁻¹)
5	A			0.17316667
4	A			0.17195833
3		B		0.15862500
2		B	C	0.15208333
1			C	0.14258333

Nota: 1, 2, 3, 4, 5, son los años de los experimentos.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

En la figura 71 se muestra el comportamiento de las concentraciones de P en pulpa de café en los cinco años que duró el experimento como consecuencia de la aplicación de los diferentes tratamientos, cuyas medias van de 0.14 mg g⁻¹ para el primer año y 0.17 mg g⁻¹ para el quinto año, tanto con el SFT como con el de RF. Resalta que los más altos contenidos se lograron con las más altas concentraciones de P.

Es importante señalar que la pulpa está teniendo en la actualidad una mayor aplicación al utilizarse como abono para el café cultivado con procesos orgánicos. Sin embargo, no obstante los altos niveles de nutrientes que contienen, diversos investigadores como Calle, (1977); Jácome, (1980); Uribe y Salazar, (1983); Gallardo *et al.*, (1988); Monge, (1999); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002), han señalado la necesidad de incorporar P y otros nutrientes en los abonos orgánicos, debido a que después de 2 ó 3 años la pulpa disminuye su contenido nutricional.

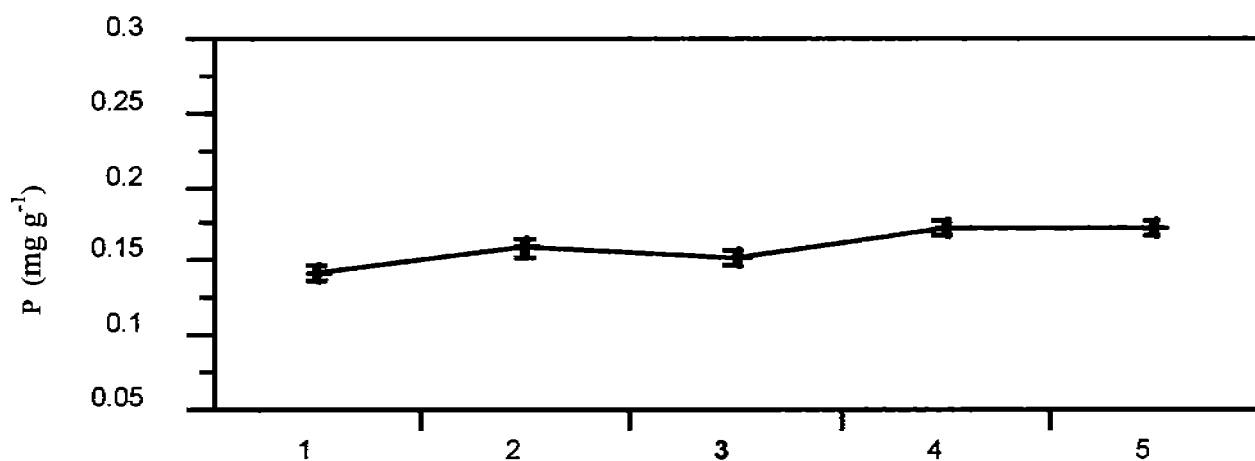


Fig. 71. Comportamiento del contenido de P en pulpa de café en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo.

En la Figura 71, se muestra los valores en pulpa de café durante los cinco años del tratamiento.

Tal como se ha señalado, durante los cinco años que duró el experimento, los niveles de deficiencia de P se reflejaron también en los contenidos de la pulpa de café observados en todos los años y épocas tanto en el testigo como en los tratamientos con bajas dosis de P. Los mejores tratamientos fueron los de las fórmulas 18-20-12, tanto con el SFT como con el de RF, notándose también que el comportamiento en las dos épocas del año muestreados, los valores encontrados en diciembre eran ligeramente más altos, por lo que se observó que hay una respuesta positiva en el contenido de P en pulpa de café. Con la aplicación del estiércol la respuesta fue intermedia, mientras que el testigo mostró niveles de deficiencia.

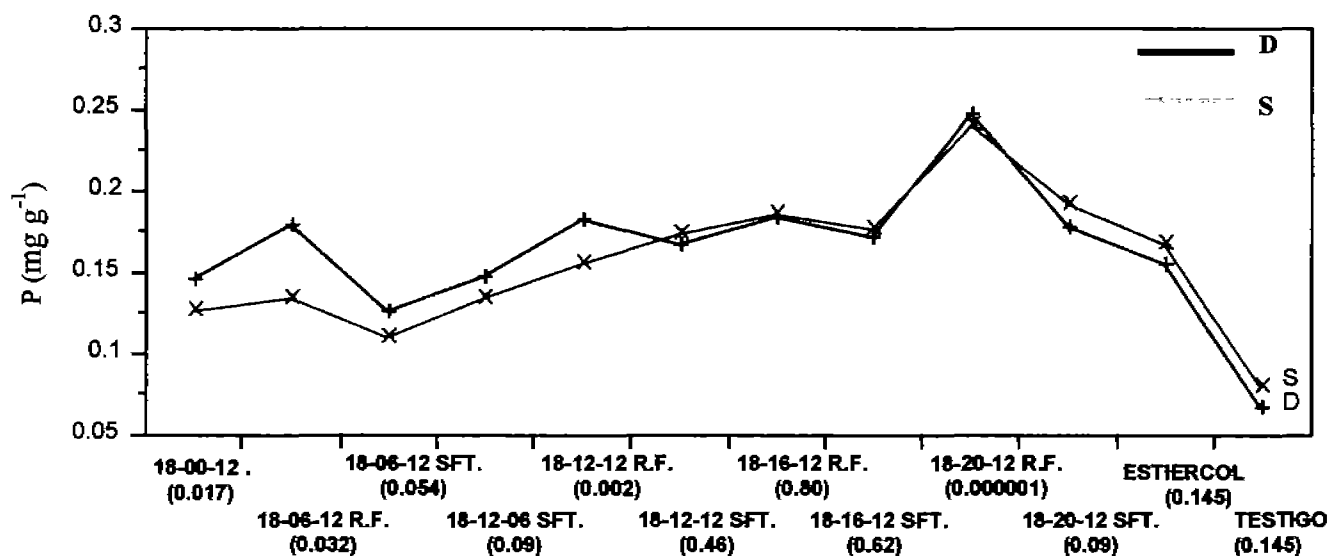


Figura 72. Contenido de P en pulpa de café en dos épocas de cosecha (septiembre y diciembre) y efecto de tratamientos. Abajo de cada fórmula de tratamiento se señalan los niveles de significancia.

En la figura 72, se observa que el P de la roca fosfórica tiene un buen efecto acumulativo en la pulpa de café. Se observa que el único tratamiento que fue altamente significativo fue el 18-20-12 con RF (0.000001), mientras que los otros tratamientos no fueron significativos. Esto ha sido también observado por algunos autores en la cereza de café como Calle, (1977); Ramírez *et al.*, (1999). Por lo que se refiere al tratamiento con estiércol, la escasa respuesta también se refleja en el bajo valor obtenido en la pulpa de café (0.16 mg g⁻¹), y está de acuerdo con lo citado por algunos autores como Monroy *et al.*, (1981); Uribe y Henao, (1981); Carvajal, (1984); Gallardo *et al.*, (1988), Hirzel *et al.*, (2004); Rivero *et al.*, (2001); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002), en el sentido de que aún cuando los abonos orgánicos con estiércoles mejoran las condiciones de fertilidad en los suelos, muchos de ellos son bajos en P, como es el caso del estiércol utilizado, por lo que es necesario adicionar necesariamente la fuente fosfatada (fertilizante inorgánico) para llevar a un equilibrio NPK y mejorar su efecto sobre la nutrición de las plantas.

En la figura 72, también se puede observar que durante los cinco años los mejores tratamientos en la pulpa de café fueron los que contienen las más altas dosis de P, 18-20-12, los cuales fueron altamente significativos (0.000001), tanto con la fuente de RF, como con SFT, la mayor concentración de P fue lograda con el uso de la RF, seguida por el SFT.

En la figura 73, se presenta la evolución de los tratamientos en los 5 años del experimento, en los que se notan los contenidos menores en el año 1, aumentando paulatinamente a través de los siguientes años, siendo el año 4 y 5, donde se tienen las

mayores concentraciones de P, obtenidos con la aplicación de las mayores dosis de P, 18-20-12 (0.00001) tanto con RF, como con el SFT (0.09), los cuales aumentaron paulatinamente el nivel de P en la pulpa de café a través cinco años del experimento, hasta lograr la máxima concentración en el año 5. El testigo permanece con bajas concentraciones de P en la pulpa de café sin muchas variaciones, y en concentraciones intermedias los tratamientos 18-16-12 y 18-12-12 tanto con RF como con SFT.

El efecto altamente significativo del P en el café oro, coincide con investigaciones realizadas en el cultivo del café, particularmente en países de Centro y Sudamérica sobre suelos volcánicos, así lo citan varios autores como Valencia *et al.*, (1979); Coste, (1978); Bravo, (1984); Muñoz, (1984); Canessa, (1987); Sancho y Alvarado; (1987); Fixen, (1990); Valencia, (1999), los cuales han observado que al aumentar la capacidad de retención de fosfatos y disminuir los contenidos de P disponible en el suelo, el contenido en la cereza de café y en los subproductos (café oro, pulpa y pergamino) disminuyen y consecuentemente las cantidades de P requeridas para llegar al ámbito adecuado en estas plantas cultivadas deben ser mayores.

En resumen, para obtener elevadas concentraciones de P en pulpa de café, fueron necesarios altas dosis de P para obtener un mejor nivel en pulpa de café. Estas cantidades altas que se requieren, son consecuencia de la fijación de P en los suelos derivados de cenizas volcánicas como lo han señalado varios investigadores como Swindale, (1964); Ramos, (1982); Ramos y Aguilera, (1984); Quantin, (1986); Quantin, (1986); Canessa *et al.*, (1987); Beck *et al.*, (1998); Fassbender *et al.*, (1998); Alvarado *et al.*, (2001); Martini, (1969); Sánchez *et al.*, (1990).

En cuanto al efecto del abonamiento orgánico y los contenidos de P, existen muy distintas opiniones sobre su efecto en las plantas. Varios autores como Monroy *et al.*, (1981); Uribe y Henao, (1981); Carvajal, (1984); Gallardo *et al.*, (1988); Rivero *et al.*, (2001); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002); Hirzel *et al.*, (2004), señalan la necesidad de un balance o adición de P en el abonamiento orgánico, ya que varios de éstos contienen escasos contenidos de P, el cual puede tomarse no aprovechable en suelos altamente fijadores de P. Asimismo señalan en general que los abonos orgánicos son más efectivos cuando se combinan con un suplemento de N, P y K.

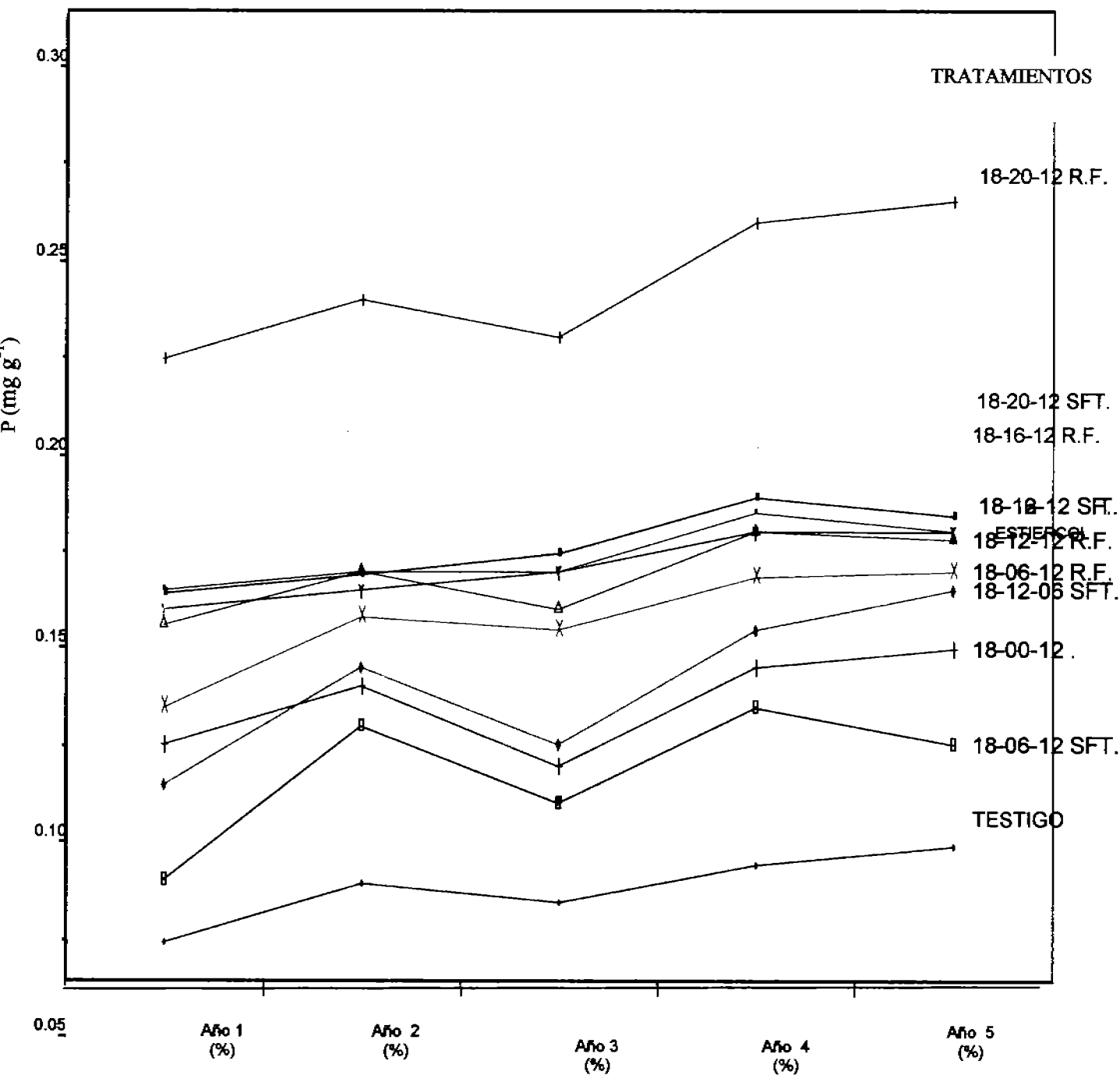


Figura 73. Respuesta global del P en la pulpa de café, por el efecto de los tratamientos durante los cinco años de aplicación.

6.5. CONCENTRACIÓN DE P EN CAFÉ ORO

Se evaluaron los cambios en la concentración de P en café oro (*Coffea arabica var catuai*), en muestras colectadas durante dos épocas de cosecha (septiembre y diciembre) y en cinco años de experimentación en campo.

El café oro es la semilla o grano, del cual se ha eliminado la pulpa y pergamino (epicarpio y mesocarpio del fruto) también conocido como café verde. La semilla del café oro está constituida en su mayor parte por el endospermo, cuyas células contienen almidón, aceites, azúcares, minerales y alcaloides y constituye el 18% del peso del fruto seco (Jácome, 1980). Desde el punto de vista de la comercialización, este es el producto más importante y junto a factores físico-químicos en el proceso de beneficio, la variedad de café, la torrefacción y molienda del café oro, liberarán los productos finales de este grano sintetizados en el aroma, cuerpo, color y sabor de la bebida (Amorin *et al.*, 1973; Carvajal, 1984; Ramírez *et al.*, 1999; Valencia, 1999).

Al inicio del experimento, las cantidades de P foliar para el testigo eran de sólo 0.12 % mg g⁻¹ (cuadro 44). Estos valores son muy bajos, lo que significa una clara deficiencia de este elemento en estos suelos lo se reflejará en una baja absorción en la semilla de café. Las cifras que dan varios autores para el P en café oro es de 0.37% de acuerdo a Haarer, (1979), mientras que Muller, (1959) y Mongue, (1999), citan que el promedio de P en las semillas de café (café oro) es de 0.28%.

En el cuadro 43, se observa el resultado del análisis de varianza donde la significancia estadística es sumamente alta (0.0001), lo que mostró el efecto de los tratamientos sobre los parámetros de estudio, como altamente significativo.

Cuadro 43. Análisis de varianza

Fuente de variación	D.F.	S.C.	C.M.	F.
Model	71	0.25073152	0.003531	25.9037
Error	48	0.00654380	0.000136	Prob > F
C. Total	119	0.25727532		<.0001

La gran deficiencia en fosfatos de los suelos utilizados se refleja en los escasos niveles absorbidos de este elemento en el café oro, obtenidos en los testigos y en los tratamientos que no contenían P o con las dosis bajas, cuyas medias llevaron a solo 0.09 mg g⁻¹ para el testigo, de 0.13 mg g⁻¹ para el 18-00-12, 0.14 mg g⁻¹ para el 18-06-12 RF, 0.12 mg g⁻¹ para el 18-06-12 SFT. Para estos tratamientos el efecto fue mejor con el tratamiento con RF que con el SFT tal como se observa en el cuadro 43. Estas concentraciones son considerados bajos de acuerdo a Muller, (1959); Haarer, (1979); Jácome, (1980); y

Mongue, (1999), lo que significa una clara deficiencia de este elemento en café oro inducida por la deficiencia de este elemento en estos suelos.

La respuesta a las aplicaciones ascendentes de P_2O_5 ya sea en forma de SFT y de RF, llevaron a aumentos crecientes en el nivel del P en café oro. En los tratamientos intermedios, las medias de los suelos que recibieron dosis 18-16-12 mostraron pocas diferencias y fluctuaron entre 0.19 mg g^{-1} y 0.17 mg g^{-1} para los tratamientos con RF y SFT respectivamente, y nuevamente los tratamientos con RF elevan ligeramente el contenido de P en café oro. En tanto, las aplicaciones 18-12-12, también elevaron los contenidos, con respecto al testigo, con valores de 0.17% para los tratamientos con SFT y 0.16 mg g^{-1} con la RF, estadísticamente sus medias mostraron pocas diferencias entre estos tratamientos.

Se observa que los tratamientos que estadísticamente dieron los valores más altos fueron los de 18-20-12, tanto con RF como con SFT elevando las concentraciones de P en café oro en 0.237 mg g^{-1} y 0.231 respectivamente. Con base en el análisis estadístico, estos resultados son equivalentes. En este tratamiento, la RF aunque solo contiene alrededor del 20% de P soluble, produjo un mejor efecto residual en el suelo y una mejor disponibilidad para la planta, pero comparado con el SFT en el mismo tratamiento, las medias mostraron pocas diferencias, lo cual sugiere que la fuente del SFT y RF son equivalentes en la respuesta de la concentración de P, sin embargo existe en la RF, un mayor efecto residual en el suelo, lo cual ha sido discutido por varios autores como Pastrana, (1979); Etchevers y Fernández, (1981), en México; Alegre *et al.*, (1991), en investigaciones en Perú; Córdoba, (1991) en Ecuador; Reyes, (1991); Herrera, (1994) y Rivero *et al.*, (2001), en Venezuela, demostrando que en suelos altamente fijadores de P, la RF libera gradualmente el P que requiere la planta y que en cultivos perennes, es una buena alternativa. Sin embargo, la fuente fosfatada soluble usada SFT, alcanzó a llevar a niveles suficientes de P en café oro, siendo la RF ligeramente superior.

Para mostrar el efecto de los tratamientos en café oro, los resultados se exponen en la figura 74 y en el cuadro 44, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en P.

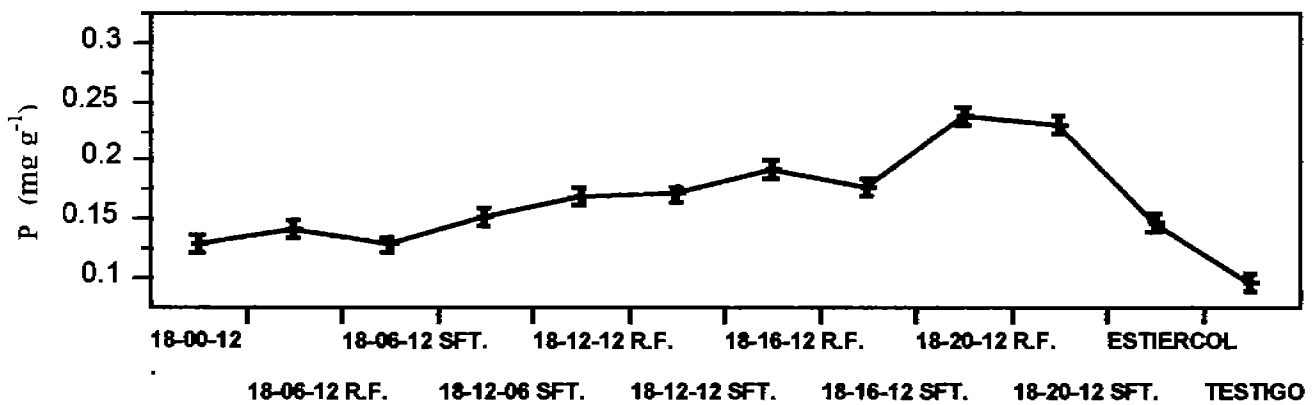


Figura 74. Efecto de los tratamientos en el contenido de P en café oro.

En la figura 74, se puede observar el comportamiento de los tratamientos sobre el contenido de P en café oro, donde se resalta que los niveles de suficiencia se logran con dosis altas de P, lo cual en este experimento se logró con los tratamientos de 18-20-12, siendo la RF al final de los experimentos el que logró el mejor nivel (0.237 mg g⁻¹), seguida por el SFT que logró concentraciones también altas (0.231 mg g⁻¹).

Cuadro 44. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en café oro en plantas de café

Tratamientos									Cuadrado de las medias P(mg g ⁻¹)
18-20-12 R.F.	A								0.23700000
18-20-12 S.F.T.	A								0.23100000
18-16-12 R.F.		B							0.19300000
18-16-12 S.T.		B	C						0.17800000
18-12-12 S.F.T.			C						0.17100000
18-12-12 R.F.			C	D					0.16880000
18-12-06 S.F.T.				D	E				0.15100000
ESTIERCOL					E	F			0.14700000
18-06-12 FC.					E	F	G		0.14120000
18-00-12 .						F	G		0.13030000
18-06-12 S.F.T.							G		0.12810000
TESTIGO								H	0.09670000

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

Con relación al tratamiento con estiércol de caballo, las medias muestran sólo 0.14 mg g⁻¹. La cantidad aplicada de 5 kg por cafeto (10 Mg/ha), no fué suficiente para elevar los contenidos de P en café oro. Aunque se reconoce las propiedades importantes de los abonos orgánicos para el cultivo de café, diversos autores como Fischersworing y Roßkamp, (2001), señalaron que no todos los estiércoles son altamente eficientes y el de caballo usado es el de menor porcentaje de P. El nivel de P en café oro obtenido con el tratamiento de estiércol en el experimento se comportó de forma similar a los tratamientos con bajos contenidos de P, como el 18-06-12, sin embargo fue mejor que el testigo, pero menor que con los tratamientos con altas dosis de P (cuadro 44 y figura 74).

Las altas cantidades de P empleadas en los tratamientos, fueron significativamente positivos. Esto se muestra en el cuadro 44, donde las medias del testigo al final de los 5 años de tratamiento continuó con bajos contenidos foliares de 0.09 mg g⁻¹ de P. Los tratamientos que no llevaron P como el 18-00-12 presentaron valores pobres de P en café oro (0.13 mg g⁻¹), mientras que las dosis medias y altas elevaron los valores de P hasta

0.23 mg g⁻¹ considerados éstos suficientes para un adecuado contenido en café oro (Muller, 1959; Haarer, 1979; Jácome, 1980; Mongue, 1999).

Con las aplicaciones de los tratamientos en dosis medias y altas de P, mejoró la concentración en café oro, lo que muestra en estos suelos una clara deficiencia de este elemento, ya que a medida que se incrementan las dosis se refleja significativamente en la concentración de este elemento en café oro. De acuerdo a varios autores como Haarer, (1977); Coste, (1978); Uribe-Henao, (1983); Carvajal, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Rena *et al.*, (1986); Fixen, (1994); Ramírez *et al.*, (1999); Valencia, (1999), el mantenimiento de valores altos o suficientes de P, junto con el N y el K, son necesarios para cubrir satisfactoriamente todas las etapas fisiológicas como crecimiento, floración, fructificación lo cual resulta indispensable para obtener cosechas adecuadas de café, donde el producto final es el grano de café denominado café oro.

Estos autores también mencionan que la variación en el contenido de P durante el curso del año no es tan grande como en el caso de otros elementos y la curva es muy semejante a la de N. Con base a estos porcentajes y en los resultados del cuadro 44 de Tukey, las concentraciones en café oro mostrados en las medias de los tratamientos van en el siguiente orden: testigo (0.096 mg g⁻¹), 18-06-12 SFT (0.128 mg g⁻¹), 18-00-12 (0.13 mg g⁻¹), 18-06-12 RF (0.14 mg g⁻¹), estiércol, 0.14 mg g⁻¹, 18-12-06 SFT (0.15 mg g⁻¹), y 18-12-12 RF (0.16 mg g⁻¹), presentan contenidos bajos que significará una deficiencia de este elemento en la semilla de café.

El efecto de los tratamientos en café oro, tuvo su máxima respuesta con la RF seguida por el SFT 18-20-12 RF (0.237 mg g⁻¹), 18-20-12 SFT (0.231 mg g⁻¹), 18-16-12 RF (0.19 mg g⁻¹), 18-16-12 SFT (0.178 mg g⁻¹), cuyas concentraciones son suficientes de acuerdo a Muller, (1959), Haarer, (1979); Jácome, (1980); y Mongue, (1999). El efecto altamente significativo del P en el café oro, coincide con investigaciones realizadas en el cultivo del café, particularmente en países de Centro y Sudamérica sobre suelos volcánicos, así lo citan varios autores como Amorin, (1973); Malavolta, (1981); Rivera *et al.*, (1983); Canessa *et al.*, (1987); Fixen, (1994); Ramírez *et al.*, (1999); Valencia, (1999), los cuales han observado que al aumentar la capacidad de retención de fosfatos y disminuir los contenidos de P disponible en el suelo, el contenido en la cereza de café y los subproductos (café oro, pulpa y pergamino) disminuyen y consecuentemente las cantidades de P requeridas para llegar al ámbito adecuado en estas plantas cultivadas deben ser mayores

6.5.1 VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN CAFÉ ORO

Los muestreos en cereza de café para obtener el café oro sólo se efectuaron en septiembre y diciembre, ya que son las épocas donde se realiza la recolección de café maduro. Los resultados se presentan en el cuadro 45 y figura 75. Fueron altamente significativas, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en el contenido de P en café oro.

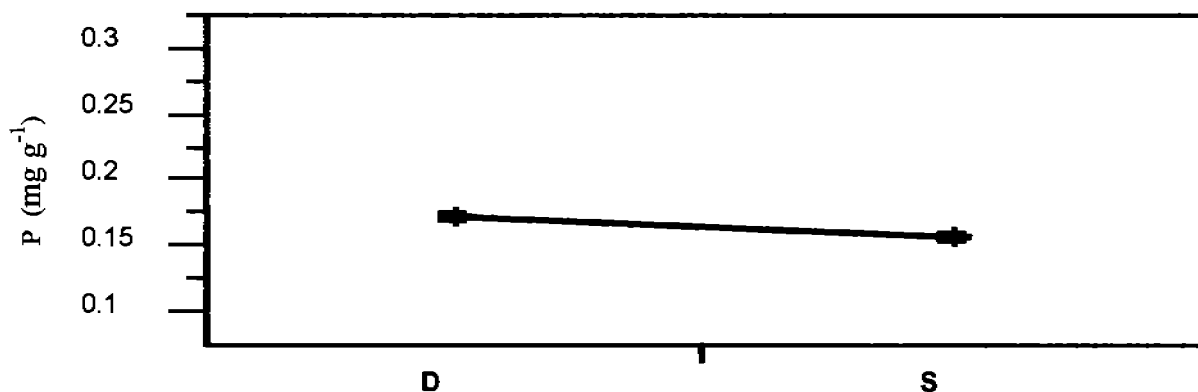


Figura 75. Comportamiento del contenido de P en café oro durante dos épocas de corte y muestreo por año.

Se encontró una menor concentración en el nivel de P en café oro en septiembre (0.15 mg g^{-1}) y el valor más alto se presenta en diciembre (0.17 mg g^{-1}), y aunque la variación de las concentraciones P no son muy marcadas, reflejan los patrones estacionales relativamente distintos en la época de lluvias, y coinciden con los períodos de mayor precipitación, absorción y fructificación. En estas etapas la planta requiere tener una disponibilidad del P para todos los procesos fisiológicos durante el crecimiento, principalmente para la fructificación, maduración, y luego posteriormente para la floración del café, tal como lo citan varios autores (Haarer, 1977; Coste, 1978; Uribe-Henao, 1983; Carvajal, 1984; Guridi *et al.*, 1985; Rena *et al.*, 1986; Fixen, 1994; Ramírez *et al.* 1999; Valencia 1999).

Cuadro 45. Comparación de medias de los tratamientos en café oro en dos épocas: septiembre y diciembre

Tratamiento	Cuadrado de las medias	Error estándar	Medias
D	0.17188333	0.00150737	0.171883
S	0.15696667	0.00150737	0.156967

En el presente experimento, luego de cinco años de aplicaciones de P_2O_5 tanto la aplicación de dosis altas de SFT como con la RF, aumentaron significativamente en todos los casos el contenido de P en café oro, el estiércol fue de respuesta intermedia, mientras que el testigo mostró deficiencias, por lo que se observó que hay una respuesta positiva en el contenido de P en café oro.

6.5.2 EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN CAFÉ ORO

En el cuadro 46, se observa la prueba de Tukey donde las diferencias entre las medias de los tratamientos son muy significativas y en la figura 76, se observa el comportamiento de P en las los cinco años de aplicación de los tratamientos.

Cuadro 46. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en café oro en los cinco años de aplicación.

Años de aplicación de tratamientos					Cuadrado de las medias P(mg g ⁻¹)
5	A				0.19195833
4		B			0.17362500
3			C		0.16241667
2			C		0.15412500
1				D	0.14000000

Nota: 1, 2, 3, 4, 5 son los años de experimentación.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

En la figura 76, se muestra el comportamiento en las concentraciones de P en café oro en los cinco años que duró el experimento, cuyas medias van de 0.14% para el primer año y 0.19 mg g⁻¹ para el quinto año, tanto con el SFT como con el de RF.

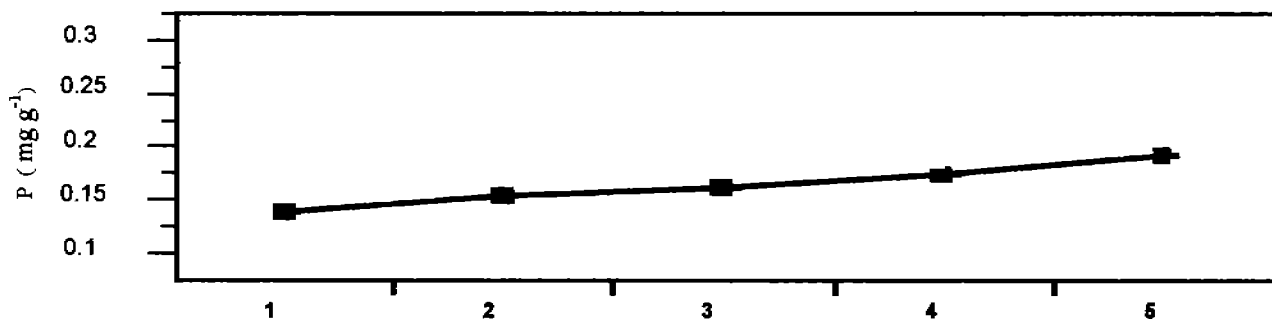


Figura 76. Efecto del contenido de P en café oro en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo

Tal como se observa, los niveles de deficiencia se refleja también a nivel del fruto de café (café oro) observados en todos los años y épocas tanto en el testigo como en los tratamientos con bajas dosis de P. Los mejores tratamientos fueron los de las fórmulas 18-20-12, tanto con el SFT como con el de RF, notándose también que el comportamiento en las dos épocas del año muestreados, los valores encontrados en diciembre eran los más altos.

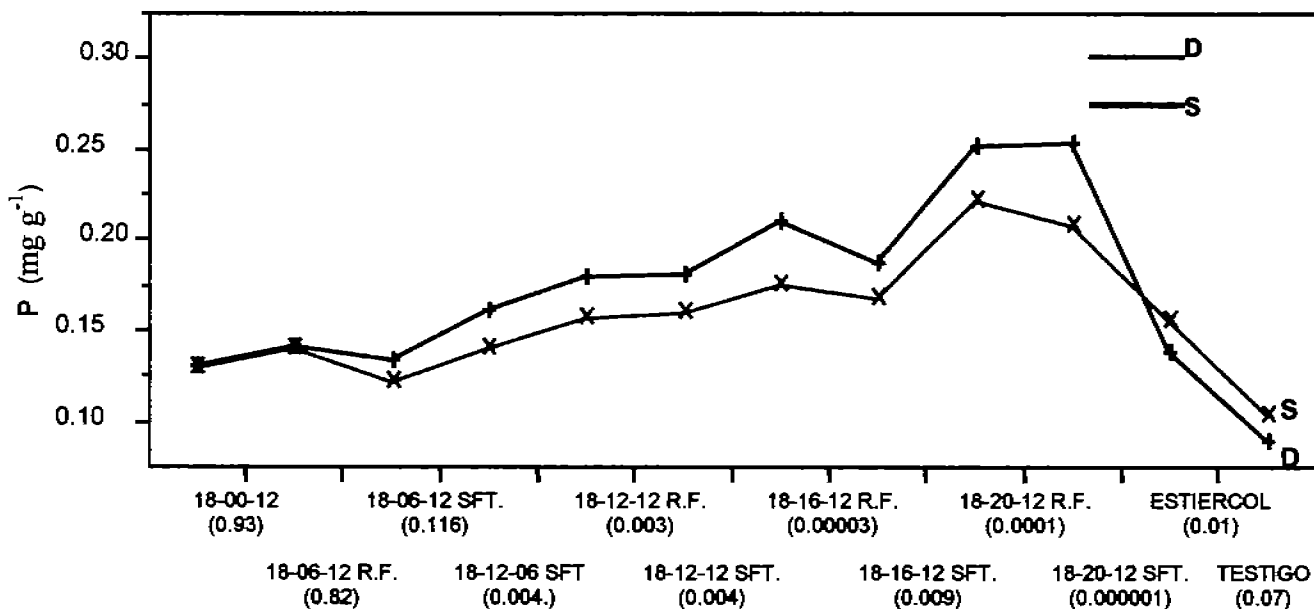


Figura 77. Contenido de P en café oro en dos épocas de cosecha (septiembre y diciembre) y efecto de tratamientos. Abajo de cada fórmula de tratamiento se señala los niveles de significancia.

Se observa que los tratamientos 18-12-12, 18-16-12, tanto con RF como con el SFT, fueron altamente significativos (0.00001), mientras que el tratamiento testigo, no fue significativo al nivel de 0.01 (0.027), como tampoco lo fue el 18-00-12 (0.03). Los tratamientos con bajas dosis de P 18-06-12 RF (0.03), 18-06-12 SFT (0.35), y el estiércol (0.096) manifestaron baja significancia. El tratamiento con mejor nivel en café oro fue el 18-20-12 RF como altamente significativo (0.00001), el cual es mejor que el 18-20-12 SFT (0.015). Puede observarse que en los cinco años la RF tiene un buen efecto acumulativo en la semilla de café, denominado café oro. Por lo que se refiere al tratamiento con estiércol, la escasa respuesta también se refleja en el café oro, y está de acuerdo con lo citado por algunos autores, (Monroy *et al.*, 1981; Uribe y Henao, 1981; Carvajal, 1984; Gallardo *et al.*, 1988; Fischersworing y Roßkamp, 2001; Rivero *et al.*, 2001; Salas *et al.*, 2001; Soto *et al.*, 2002; Hirzel *et al.*, 2004), en el sentido de que aún cuando los abonos orgánicos con estiércoles mejoran las condiciones de fertilidad en los suelos, muchos de ellos son bajos en P, como es el caso del estiércol utilizado, por lo que es necesario adicionar la fuente fosfatada (fertilizante inorgánico) para un mejor efecto sobre la nutrición de las plantas.

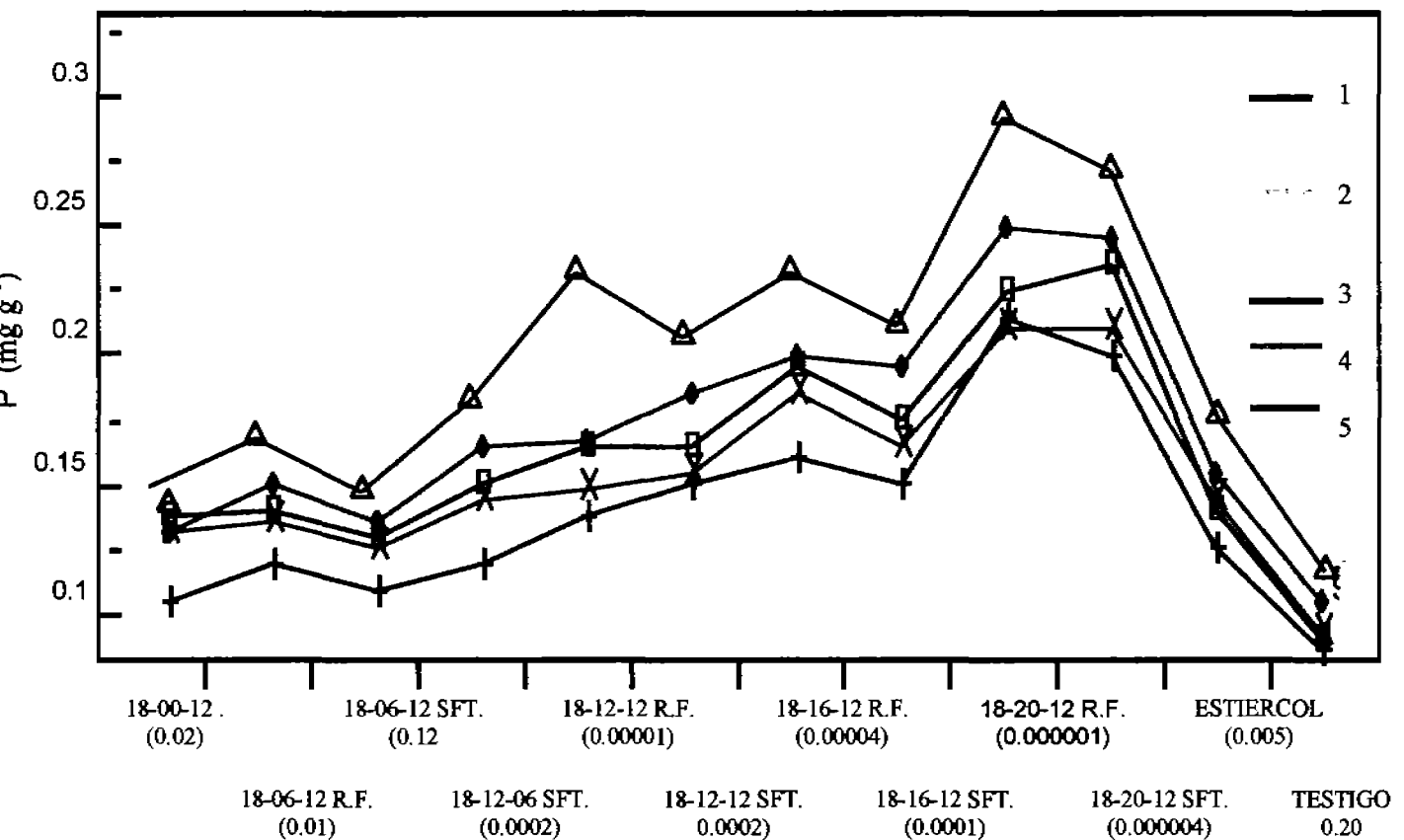


Figura 78. Contenido de P en café oro durante cinco años de tratamientos. Abajo de cada tratamiento se muestra el nivel de significancia.

En la figura 78, se puede observar que durante los cinco años los mejores tratamientos fueron los que contienen las dosis más altas de P, 18-20-12, los cuales fueron altamente significativos (0.00001), tanto con RF, como con SFT, notándose que en el último año, se alcanza la mayor concentración de P en café oro, obtenida a través de la RF, seguida por el SFT. Los tratamientos testigo, mostraron las menores concentraciones de P en el café oro.

Los tratamientos con dosis intermedias 18-16-12 tanto con RF como con SFT fueron también altamente significativas (0.0001), seguidas por los que recibieron los tratamientos 18-12-06, (0.00001) con RF y SFT. Los tratamientos con dosis 18-06-12 RF y SFT (0.01) y (0.12) respectivamente, así mismo las dosis bajas 18-00-12 (0.001), 18-06-12 RF (0.013) y el testigo no fueron significativas (0.0046).

En la figura 79, puede observarse la evolución de los tratamientos en los 5 años del experimento, en los que se observa los menores contenidos en el año 1, aumentando paulatinamente a través de los siguientes años, hasta el año 5, en el cual se tiene el mayor nivel de P encontrado con la aplicación de las dosis altas de los tratamientos, 18-20-12 (0.00001), tanto con RF, como con el SFT, mientras que el testigo permanece con bajas concentraciones de P en café oro sin muchas variaciones, y en concentraciones intermedias los tratamientos 18-16-12 y 18-12-12 tanto con RF como con SFT.

Al respecto, varios autores (Haarer, 1977; Coste, 1978; Uribe-Henao, 1983; Uribe-Henao, 1983; Carvajal, 1984; Guridi *et al.*, 1985; Rena *et al.*, 1986; Fixen, 1994; Ramírez *et al.*, 1999; Valencia, 1999), señalan la importancia de la absorción de nutrimentos para una adecuada fructificación y crecimiento del cafeto, ya que si la cantidad de uno de estos elementos es relativamente baja en el medio en el cual crece, se afectan su vigor, su desarrollo y especialmente su productividad, como consecuencia de una deficiencia mineral.

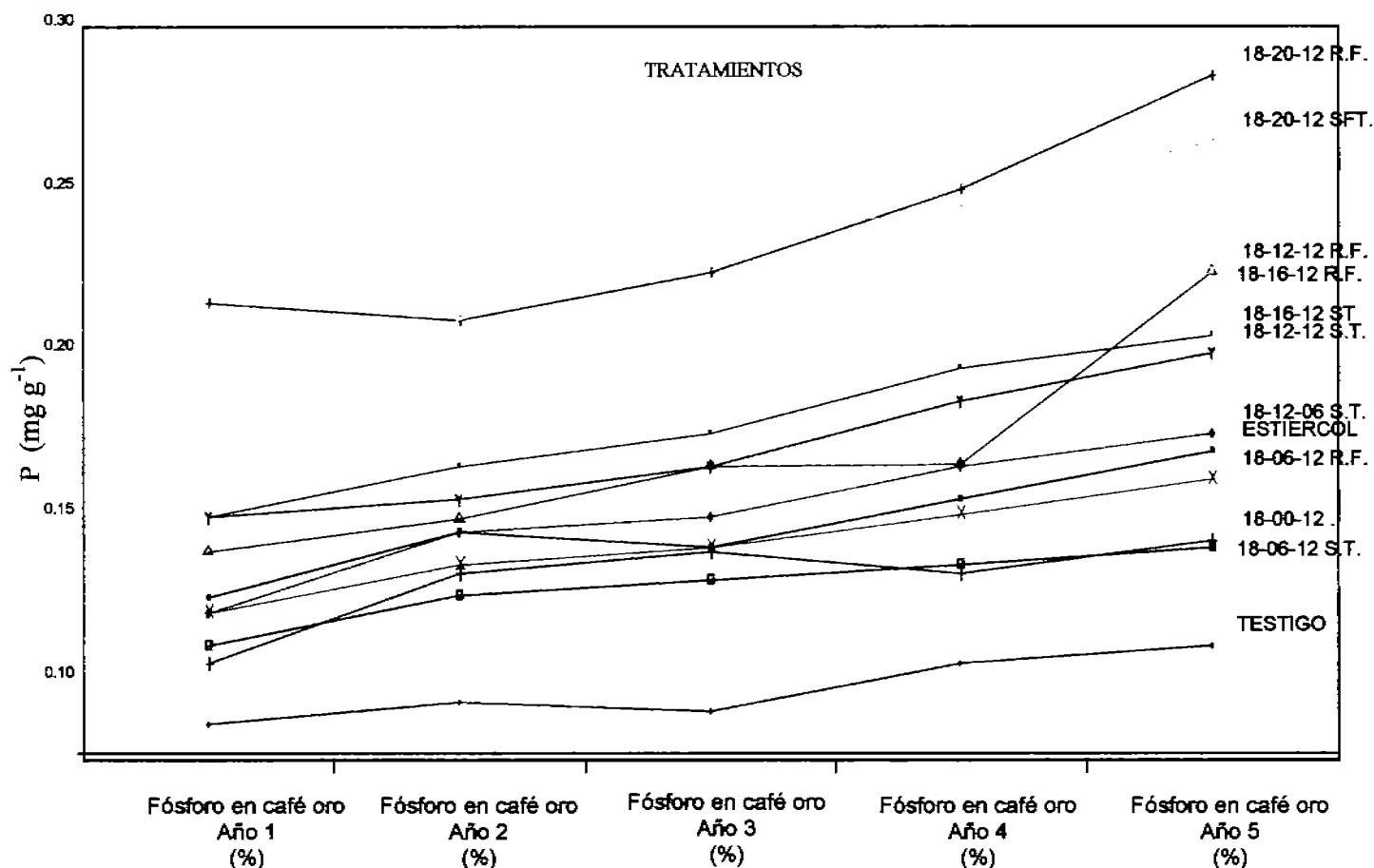


Figura 79. Respuesta global de los tratamientos durante los cinco años de aplicación en café oro

De acuerdo a varios investigadores como Haarer, (1977); Coste, (1978); Rivera *et al.*, (1983); Uribe-Henao, (1983); Carvajal, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Rena *et al.*, (1986); Inmecafé, (1990); Fixen, (1994); Monge, (1999); Ramírez *et al.*, (1999); Valencia, (1999), el análisis de los contenidos de P en la semilla de café (café oro), al igual que en otros subproductos del café permite valorar deficiencia o suficiencia de este elemento, señalando además que siendo este elemento vital por las funciones que desempeña en funciones metabólicas que tiene que ver con la calidad de café. Más específicamente Amorin *et al.*, (1968), citados por Malavolta, (1981), señalan que una deficiencia de P, o un exceso de N y de K, causan disminuciones significativas en la calidad de la bebida, por lo que afirman que existe una relación directa en la calidad de la bebida y los nutrientes, específicamente, con respecto al P.

Muller, (1959) y Mongue, (1999), citan que el promedio de P en las semillas de café (café oro) es de 0.28% y que la variación durante el curso del año no es tan grande como en el caso de otros elementos, por lo que la curva es muy semejante a la de N. Con base a estos porcentajes y en los resultados del cuadro 46 de Tuckey, las concentraciones en café oro mostrados en las medias de los tratamientos van en el siguiente orden: testigo (0.09 mg g^{-1}), 18-06-12 SFT (0.12 mg g^{-1}), 18-00-12 (0.13 mg g^{-1}), 18-06-12 RF (0.14 mg g^{-1}), estiércol, (0.14 mg g^{-1}), 18-12-06 SFT (0.15 mg g^{-1}), y 18-12-12 RF (0.16 mg g^{-1}), lo que significa contenidos y deficiencias de este elemento en la semilla de café.

El efecto de los tratamientos en el café oro, tuvo su máxima respuesta con la RF seguida por el SFT: 18-20-12 RF (0.237 mg g^{-1}), 18-20-12 SFT (0.231 mg g^{-1}), 18-16-12 RF (0.19 mg g^{-1}), 18-16-12 SFT (0.178 mg g^{-1}). Este efecto altamente significativo del P en el café oro, coincide con investigaciones realizadas en el cultivo del café, particularmente en países de Centro y Sudamérica sobre suelos volcánicos, así lo citan varios autores como Canessa, Sancho, y Alvarado, (1987), los cuales han observado que al aumentar la capacidad de retención de fosfatos y disminuir los contenidos de P disponible en el suelo, el contenido en la cereza de café y los subproductos (café oro, pulpa y pergamino) disminuyen y consecuentemente las cantidades de P requeridas para llegar al ámbito adecuado en estas plantas cultivadas deben ser mayores.

Los tratamientos elevados de P que fueron necesarios para un mejor nivel en café oro son consecuencia de la fijación de P en los suelos derivados de cenizas volcánicas, tal como lo señalan Swindale, (1964); Martini, (1969); Martini, (1969); Ramos, (1982); Ramos *et al.*, (1984); Quantin, (1986); Canessa *et al.*, (1987); Sánchez *et al.*, (1990); Beck *et al.*, (1998); Fassbender *et al.*, (1998); Alvarado *et al.*, (2001). Así mismo varios autores señalan que las condiciones del suelo tienen influencia decisiva en la disponibilidad y aprovechamiento del P, como sucede en los suelos estudiados, por lo que se torna crítico cuando se requieren cosechas abundantes y la cantidad de P es insuficiente, por lo que las aplicaciones de fertilización deben considerar la cantidad de nutrimentos que existen en el suelo, ya que los diversos tipos de suelos los contienen en distintas cantidades y en condiciones químicas a veces no fácilmente asimilables, como es el caso del P del suelo utilizado en el presente experimento (Valencia *et al.*, 1977; Coste, 1978; Bravo, 1984; Muñoz, 1984; Sancho y Alvarado, 1987; Fixen, 1990; Valencia, 1999).

Estos últimos autores resaltan que el P juega un papel de mucho relieve en la calidad del café junto con el N y Mg, además de que es fundamental para el amarre (retención ó fijación) de los frutos, así como en su desarrollo, y aunque su deficiencia se observa claramente en el nivel foliar también tiene un impacto en la calidad de la cereza de café (café oro).

No obstante la importancia que está teniendo en los últimos años el abonamiento orgánico, autores como Monroy *et al.*, (1981); Uribe y Henao, (1981); Carvajal, (1984); Gallardo *et al.*, (1988); Rivero *et al.*, (2001); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002); Hirzel *et al.*, (2004), señalan que existen diferentes opiniones sobre su efecto en la producción y obviamente en su contenido en café oro, sin embargo coinciden sobre la necesidad de un balance de P o adición de P, ya que varios de los materiales orgánicos usados, sean estiércoles e inclusive la pulpa de café, no siempre contienen P en cantidades suficientes,

por lo cual puede tornarse crítico o no aprovechable en suelos altamente fijadores de P. Asimismo señalan en general que los abonos orgánicos son más efectivos cuando se combinan con un suplemento de N, P y K, y que los contenidos de NPK pueden disminuir considerablemente después de dos o tres años de aplicados en el cultivo y finalmente que las deficiencias de P, K y Ca, interrumpen el metabolismo del N.

6.6. CONCENTRACIÓN DE P EN PERGAMINO DE CAFÉ

Se evaluaron los cambios en la concentración de P en la fracción denominada pergamino de la semilla de café (*Coffea arabica var catuai*), en muestras obtenidas por la recolecta durante dos épocas de cosecha (septiembre y diciembre) y en cinco años de experimentación en campo.

Se denomina pergamino o cáscara a la cubierta dura que constituye el endocarpio. Es un subproducto de la cereza de café, botánicamente es el endocarpio del fruto. Durante el proceso de obtención del grano para su comercialización el café seco pasa por un trillado mecánico para eliminar o descascarar la semilla. El pergamino constituye alrededor del 12.6 % del peso del fruto y se señala que dentro de los subproductos de café es el de menor contenido en P y N, mientras que es alto en Ca^{2+} , con un valor medio de P alrededor de 0.08% (Calle, 1977; Haarer 1977; Coste, 1978; Carvajal, 1984).

Desde el punto de vista del uso de este subproducto, ha carecido de importancia por su bajo contenido en nutrientes, por lo que en muchos beneficios del café es depositado en suelos, tirado en los arroyos o ríos, acentuando la contaminación de aguas en zonas cafetaleras, aunque en algunas fincas ha sido utilizado como combustible.

Se incluyó en éste experimento para conocer su contenido de P y saber si al igual que los otros productos también había diferencias como respuesta a los tratamientos probados.

Al inicio del experimento, las cantidades de P en el pergamino para el testigo eran de sólo 0.03 mg g^{-1} (cuadro 48).

Aunque los contenidos son menores comparados con las concentraciones foliares, en pulpa y en café oro, en el cuadro 47, se observa el resultado del análisis de varianza donde la significancia estadística es sumamente alta (0.0001), lo que mostró el efecto de los tratamientos sobre los parámetros de estudio, como altamente significativo.

Cuadro 47. Análisis de varianza

Fuente de variación	DF	S.C	C.M.	F
Model	61	0.03037594	0.000498	8.1546
Error	59	0.00360287	0.000061	Prob > F
C. Total	120	0.03397881		<.0001

La respuesta a las aplicaciones ascendentes de P_2O_5 ya sea en forma de SFT y de RF, llevaron a aumentos crecientes en el nivel del P en el pergamino, aunque la variación es muy pequeña y fluctuaron de 0.03 mg g^{-1} a 0.078 mg g^{-1} . Las medias llevaron a solo 0.03 mg g^{-1} para el testigo, 0.03 mg g^{-1} para el 18-06-12 SFT, de 0.04 mg g^{-1} para el 18-00-12, 0.04 mg g^{-1} para el 18-12-06, 0.04 mg g^{-1} para el 18-06-12 RF, 0.05 mg g^{-1} para el 18-12-12 RF, 0.05 mg g^{-1} para el 18-12-12 SFT.

En estos tratamientos no se observó un efecto determinante por la RF ó el SFT, tal como se observa en el cuadro 48, ya que los incrementos no son muy amplios, aunque con los tratamientos 18-06-12 se nota un mejor efecto con la RF que con el SFT (0.03 mg g^{-1} , y 0.04 mg g^{-1} respectivamente); con la fórmula 18-12-12 el efecto fue ligeramente mejor con el SFT que con la RF (0.053 mg g^{-1} y 0.054 mg g^{-1} respectivamente) y no fueron significativos.

En los tratamientos intermedios, las medias de los suelos que recibieron dosis 18-16-12 con RF y SFT respectivamente, mostraron pocas diferencias y fluctuaron entre 0.063 mg g^{-1} y 0.064 mg g^{-1} , y nuevamente los tratamientos con RF elevan ligeramente el contenido de P en pergamino de café.

Para mostrar el efecto de los tratamientos sobre el pergamino de café, los resultados se exponen en la figura 80 y en el cuadro 48, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en P.

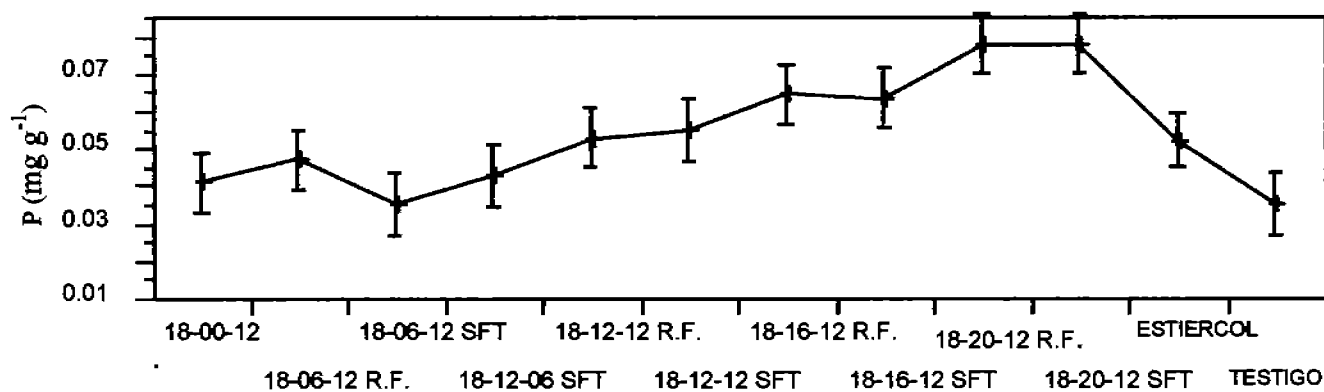


Figura 80. Efecto de los tratamientos en el contenido de P en pergamino de café

En esta figura se puede observar el comportamiento de los tratamientos sobre el contenido de P en el pergamino de café, donde se resalta que los niveles de suficiencia se logran con dosis altas a medias de P, lo cual en este experimento se logró con las dosis de 18-20-12, tanto con la RF como con el SFT, registrándose el nivel más alto con un contenido de 0.078 mg g^{-1} en ambos casos.

Cuadro 48. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pergamino de café

Tratamiento									Cuadrado de las medias P (mg g ⁻¹)
18-20-12 R.F	A								0.07816667
18-20-12 S.F.T	A								0.07816667
18-16-12 R.F		B							0.06466667
18-16-12 S.F.T		B	C						0.06366667
18-12-12 S.F.T		B	C	D					0.05496667
18-12-12 R.F.		B	C	D	E				0.05316667
ESTIERCOL			C	D	E	F			0.05236667
18-06-12 R.F.				D	E	F	G		0.04716667
18-12-06 S.F.T.					E	F	G	H	0.04306667
18-00-12 .						F	G	H	0.04116667
18-06-12 S.F.T.							G	H	0.03536667
TESTIGO								H	0.03526667

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

Con relación al tratamiento con estiércol de caballo, las medias muestran sólo 0.05 mg g⁻¹. En este sentido, tal como también se ha señalado en los contenidos foliares, en pulpa, en café oro, varios investigadores como Uribe y Henao, (1981); Monroy *et al.*, (1981); Carvajal, (1984); Gallardo *et al.*, (1988); Fischersworing y Roßkamp, (2001); Rivero *et al.*, (2001); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002); Hirzel *et al.*, (2004), entre otros están de acuerdo en el uso de los abonos orgánicos para el cultivo de café, pero hacen notar que no todos los estiércoles son altamente eficientes y el de caballo usado en este experimento es señalado como los que tienen menor porcentaje de P. Por lo anterior, el nivel de P obtenido en el pergamino de café, con el tratamiento de estiércol en el experimento, se comportó de forma similar a los tratamientos con bajos contenidos de P, como el 18-06-12, sin embargo fue mejor que el testigo, pero menor que con los tratamientos con altas dosis de P (cuadro 48 y figura 80). Con respecto a la utilización del pergamino como abono orgánico, señalan que el nivel del P en este subproducto no es muy significativo para reincorporarlo como abono al suelo por el bajo contenido en nutrientes NPK.

Finalmente las altas cantidades de P empleadas en los tratamientos, fueron significativamente positivos. Esto se muestra en el cuadro 48, donde las medias del testigo al final de los 5 años de tratamiento continuó con bajos contenidos foliares de 0.03% de P. Los tratamientos que no llevaron P como el 18-00-12 presentaron valores pobres de P en el pergamino de café (0.04 mg g⁻¹), mientras que las dosis medias y altas elevaron ligeramente los valores de P hasta 0.078 mg g⁻¹ considerados altos para el pergamino (Calle, 1977; Haarer, 1977; Coste, 1978; Carvajal, 1984).

6.6.1 VARIACIÓN TEMPORAL EN LA CONCENTRACIÓN DE P EN PERGAMINO DE CAFÉ

La obtención del pergamino de café se obtuvo en las cosechas de septiembre y diciembre, ya que son las épocas donde se realiza la recolección de café maduro. Los resultados se presentan en la cuadro 49 y figura 81. Fueron altamente significativas, se comparan las medias y se hace notar aquellos tratamientos que resultaron más altos en el contenido de P en pergamino.

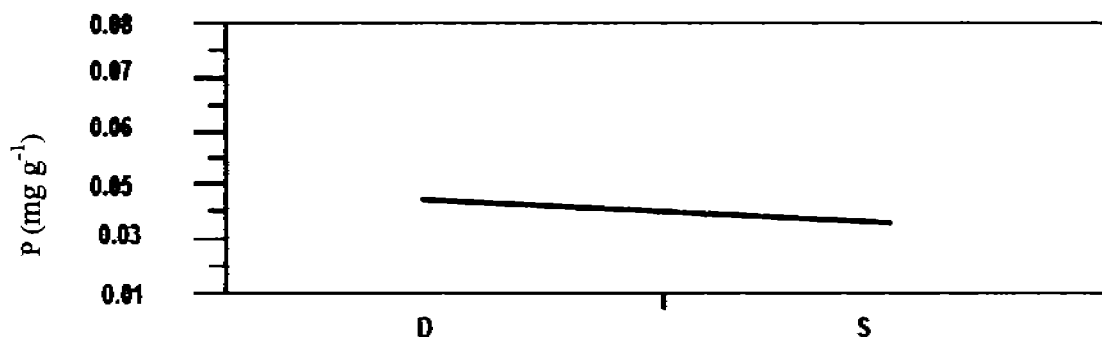


Figura 81. Comportamiento del contenido de P en pergamino de café durante dos épocas de corte (diciembre y septiembre), durante cinco años

El comportamiento de las concentraciones de P en pergamino de café en las diferentes épocas se muestra en el cuadro 49 y figura 81. Aunque la variación de las medias en las concentraciones de P entre septiembre y diciembre (de 0.038 mg g⁻¹ 0.040 mg g⁻¹) no son muy marcadas, la escasa diferencia reflejan los patrones estacionales relativamente distintos en la época de lluvias donde fisiológicamente se incrementa la absorción hacia el fruto de café y en consecuencia en pulpa, pergamino y café oro, tal como lo citan Haarer, (1977); Coste, (1978); Uribe-Henao, (1983); Carvajal, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Rena *et al.*, (1986); Fixen, (1994); Ramírez *et al.*, (1999); Valencia, (1999).

Cuadro 49. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pergamino de café en las diferentes épocas de aplicación

Tratamiento			Cuadrado de las medias (P mg g ⁻¹)
D	A	B	0.04080000
S	A	B	0.03873333

Nota: M (mayo), D (diciembre) son las épocas de aplicación de los tratamientos en el año.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

6.6.2 EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN PERGAMINO DE CAFÉ

En el cuadro 47, se observa que el resultado del análisis de varianza es significativo y en el cuadro 50, se observa la prueba de Tukey donde las diferencias entre tratamientos son muy significativas y en la figura 82, se observa el comportamiento de P en las dos épocas de muestreo.

Cuadro 50. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pergamino de café en los cinco años de aplicación.

Años de aplicación de tratamientos				Cuadrado de las medias P (mg g ⁻¹)
5	A			0.06304167
4		B		0.05545833
3		B	C	0.05283333
2		B	C	0.04929167
1			C	0.04904167

Nota: 1,2,3,4,5 son los años de los experimentos.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

En la figura 82, se muestra el comportamiento de las concentraciones de P en pergamino de café durante los cinco años que duró el experimento. Las medias de los tratamientos van de 0.049 mg g⁻¹ para el primer año y 0.063 mg g⁻¹ para el quinto año, tanto con el SFT como con RF.

En las figuras 82 y 80, se muestra la tendencia de los valores de pergamino de café durante los cinco años del tratamiento y en las dos épocas del año.

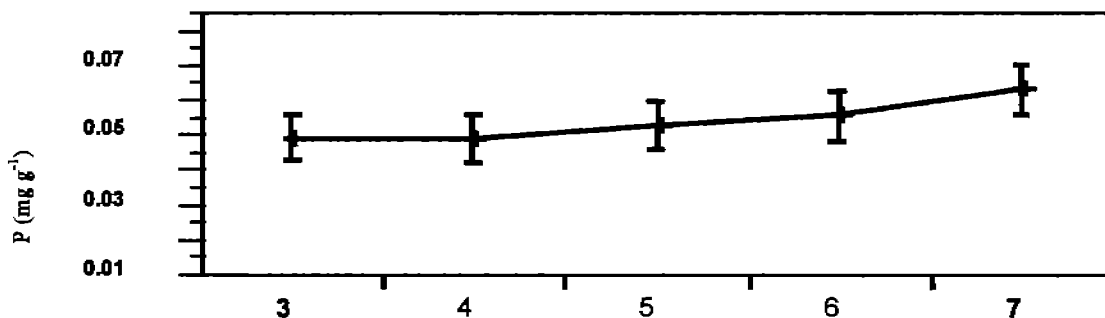


Fig. 82. Efecto del contenido de P en pergamino de café en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo.

Tal como se observa durante los cinco años que duró el experimento, las bajas concentraciones de P se reflejan también en los contenidos en el pergamino de café. Los mejores tratamientos fueron los de las fórmulas 18-20-12, tanto con el SFT como con el de RF. Así mismo en el comportamiento en las dos épocas del año muestreados, los valores encontrados en diciembre fueron ligeramente los más altos.

Aunque los contenidos de P en el pergamino de café son muy bajos (0.035 mg g^{-1}), de todas formas, se observa en la figura 83, que hubo efecto en el incremento del contenido de P durante los cinco años, siendo los mejores tratamientos los que contienen las más altas dosis de P, 18-20-12 (0.078 mg g^{-1}), tanto con RF como con SFT. Al igual que con otros subproductos, en las medias de los tratamientos con estiércol, la escasa respuesta también se refleja en el escaso contenido de P en el pergamino de café (0.052 mg g^{-1}), lo cual lo señalan diversos autores como Monroy *et al.*, (1981); Uribe y Henao, (1981); Carvajal, (1984); Gallardo *et al.*, (1988); Fischersworrning y Roßkamp, (2001); Rivero *et al.*, (2001); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002); Hirzel *et al.*, (2004), por lo que algunos autores recomiendan adicionar la fuente fosfatada (fertilizante inorgánico) para un mejor efecto sobre la nutrición de las plantas.

Las medias del tratamiento testigo, mostraron las menores concentraciones de P en el pergamino de café (0.035%), ésta deficiencia aunada a bajos contenidos en N, mantienen en una condición desfavorable al pergamino para abono orgánico, comparado con la pulpa de café, lo cual ya ha sido observado por otros autores como Calle, (1977); Jácome, (1980); Uribe y Salazar, (1983); Gallardo *et al.*, (1988); Monge, (1999); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002).

También puede observarse la evolución de los tratamientos en los 5 años del experimento (fig. 83), en los que se observa los menores contenidos en el año 3, aumentando paulatinamente a través de los siguientes años, hasta el año 5, en el cual se tiene el mayor nivel de P logrado con la aplicación de las mayores dosis de P, 18-20-12, tanto con RF, como con el SFT.

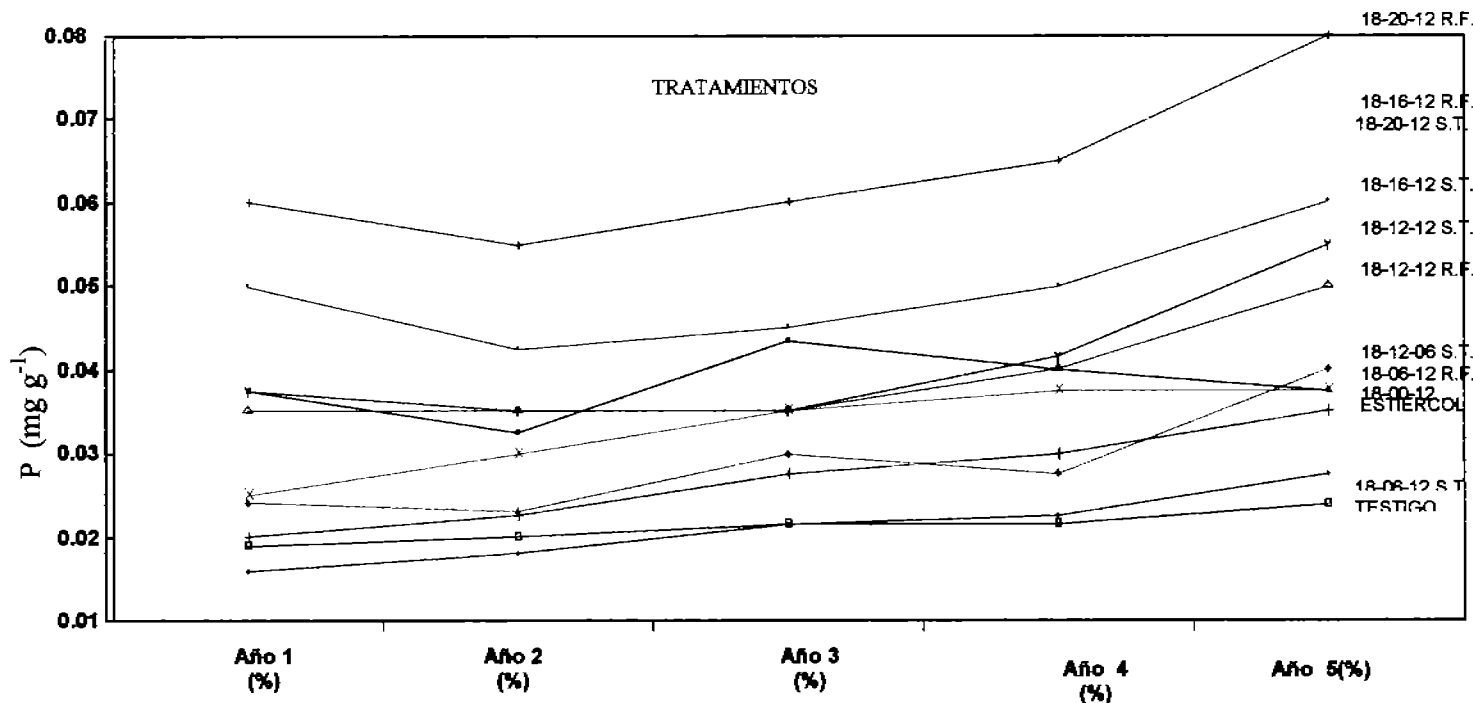


Figura 83. Respuesta global de los tratamientos durante los cinco años de aplicación en pergamino de café.

Como se ha señalado anteriormente, en investigaciones de Calle, (1977); Haarer, (1977); Coste, (1978); Monroy *et al.*, (1981); Uribe-Henao, (1983); Carvajal, (1984); Gallardo *et al.*, (1988); Monge, (1999); Rivero *et al.*, (2001); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002); Salas *et al.*, (2003), señalan que el pergamino constituye alrededor del 12.6 % del peso del fruto y se cita como un valor medio de P muy bajo alrededor de 0.08%, así mismo agregan que la variación en el contenido de P durante el curso del año no es tan grande como en el caso de los otros subproductos del café como la pulpa, café oro y en el nivel foliar. Con base a estos porcentajes y en los resultados del cuadro 48 de Tukey, las concentraciones en pergamino de café mostrados en las medias de los tratamientos van en el siguiente orden: testigo (0.035 mg g⁻¹), 18-06-12 SFT (0.035 mg g⁻¹), 18-00-12 (0.041 mg g⁻¹), 18-06-12 RF (0.043 mg g⁻¹), estiércol, 0.052 mg g⁻¹, 18-12-06 SFT (0.043 mg g⁻¹), 18-12-12 RF (0.053 mg g⁻¹), 18-12-12 SFT (0.054 mg g⁻¹). El efecto de los tratamientos en el pergamino de café, tuvo su mejor resultado con las dosis 18-20-12 RF (0.078 mg g⁻¹) tanto con roca fosfórica como con superfosfato triple, 18-16-12 RF (0.064 mg g⁻¹) y 18-16-12 SFT (0.063 mg g⁻¹).

6.7. CORRELACIONES ENTRE EL FÓSFORO EN SUELOS, FOLIAR, CAFÉ ORO, PULPA Y PERGAMINO

La evaluación de las relaciones entre las concentraciones de P en suelos, foliar, pulpa de café, café oro y pergamino, se hizo porque hay razón para suponer que estas variables están estrechamente relacionadas, tal como lo señalan diversos investigadores como Swindale, (1964); Martini, (1969); Ramos, (1982); Ramos *et al.*, (1984); Quantin, (1986); Canessa *et al.*, (1987); Beck *et al.*, (1998); Fassbender *et al.*, (1998); Sánchez *et al.*, (1990); Alvarado *et al.*, (2001).

En el cuadro 51, se presentan los coeficientes de correlación entre los tratamientos y porcentajes de P obtenidos. Se encontró covariación con significado estadístico, o sea dependencia entre el porcentaje de P en suelos, a nivel foliar, en los suelos, en café oro, pulpa y pergamino. Tales coeficientes corresponden al promedio de los tratamientos y para cada uno de estos en forma individual y entre ellos. Las correlaciones de más alto nivel se presentaron con las más altas dosis de tratamientos de P.

Cuadro 51. Correlaciones por pares de variables

Variable	Por variable	Correlación
1. P suelos	P foliar	0.7801
2. P suelos	P café oro	0.8030
3. P suelos	P pulpa	0.7367
4. P suelos	P pergamino	0.7612
5. P foliar	P en suelo	0.7801
6. P café oro	P en suelo	0.8030
7. P café oro	P foliar	0.6740
8. P pulpa	P en suelo	0.7367
9. P pulpa	P foliar	0.6671
10. P pulpa	P café oro	0.8286
11. P pergamino	P en suelo	0.7612
12. P pergamino	P foliar	0.6621
12. P pergamino	P café oro	0.8372
14. P pergamino	P pulpa	0.7561

En general todas las correlaciones son positivas y altas. El efecto altamente significativo del P sobre la variables suelo, nivel foliar, café oro, pulpa y pergamino, coincide con investigaciones realizadas en el cultivo del café, particularmente en países de Centro y Sudamérica sobre suelos volcánicos, así lo citan varios autores como, Gamboa *et al.*, (1976); Valencia *et al.*, (1977); Moraes *et al.*, (1979); Hiraci, (1981); Bravo, (1984); Carvajal, (1984); Muñoz, (1984); Guridi *et al.*, (1985); Canessa *et al.*, (1987); Chavarría *et al.*, (1999); Valencia, (1999), los cuales han observado que al aumentar la capacidad de retención de fosfatos y disminuir los contenidos de P disponible en el suelo, el contenido

foliar disminuye y consecuentemente las cantidades de P requeridas para llegar al ámbito de suficiencia deben ser mayores. A continuación se analizan cada una de estas correlaciones.

6.7.1. CORRELACIONES DEL P EN SUELOS

Las correlaciones positivas del P en suelos fueron entre:

P suelos-P foliar	0.7801
P suelos-P café oro	0.8030
P suelos-P pulpa	0.7612
P suelo-P pergamino	0.7612

Dentro de los coeficientes de correlación de los tratamientos con P en los suelos, destacan como los más altos al de café oro, seguido por el foliar, pulpa y pergamino.

Tal como ya se discutió en el apartado de suelos, el P aprovechable es bajo, lo que concuerda con el alto porcentaje de P-fijado (cuadro 30). Como se citó, este comportamiento es ampliamente reconocido por diversos autores como Swindale, (1964); Martini, (1969); Ramos, (1982); Ramos *et al.*, (1984); Quantin, (1986); Canessa *et al.*, (1987); Sánchez *et al.*, (1990); Beck *et al.*, (1998); Fassbender *et al.*, (1998); Alvarado *et al.*, (2001).

Autores que más investigaciones ha dedicado a éste tema en América Latina, como Fassbender, (1966, 1968, 1969, 1975); Fassbender *et al.*, (1967, 1969, 1978, 1987), así como en la completa revisión y compilación que hace Alvarado *et al.*, (2001), señalan que las fracciones orgánicas como las inorgánicas son las que influyen sobre el comportamiento del P en el suelo y determinan su escasa disponibilidad para las necesidades fisiológicas de las plantas.

Tal como se discutió, los tratamientos con dosis elevadas tuvieron un efecto altamente significativo con las respuestas en el nivel foliar, café oro, pulpa y pergamino, no así el testigo, el cual al final de los 5 años de tratamiento continuó con bajos contenidos de $5.00 \mu\text{g g}^{-1}$ de P, mientras que las dosis medias y altas como los del tratamiento 18-20-12 tanto con Superfosfato triple (SFT) como con Roca fosfórica (RF), elevaron los contenidos de altos a muy altos de P en el suelo, hasta llegar a valores de $46.29 \mu\text{g g}^{-1}$ considerados éstos suficientes para una adecuada nutrición fosfatada (Ramírez, 1980; Carvajal, 1984; Mongue, 1999).

De acuerdo a lo anterior, existió una correlación más alta para el nivel de P en los suelos con el café oro (0.8030). Esto señala la importancia de este elemento en los suelos para una adecuada disponibilidad en la fructificación, por lo que la adición de fuentes fosfatadas en el experimento para mejorar la absorción de este elemento, tuvieron

influencia en el café oro, siendo este el producto más importante del cultivo de café para su comercialización final.

En cuanto al nivel foliar, también reflejó muy bien el comportamiento del P en los suelos, con un correlación alta (0.7801), siguiendo la pulpa de café (0.7612), y el pergamino (0.7612). Ya que los contenidos de P y de otros elementos en el nivel foliar representan el estado nutritivo en la planta y que determinará la disponibilidad de este elemento para la cereza de café y de los subproductos finales de éste como el café oro, pulpa y pergamino, el nivel de correlación representó el efecto altamente significativo que tuvieron los tratamientos sobre estos suelos altamente fijadores de P.

6.7.2. CORRELACIÓN P FOLIAR-P EN EL SUELO

El coeficiente de correlación entre el P foliar y el P en el suelo es alto (0.7801).

De acuerdo a varios investigadores como Carvajal, (1963); Chebadi, (1970); Parra, (1972); Jiménez, (1980); Hiroce, (1981); Noriega *et al.*, (1981); Snoeck, (1984); Valencia, (1984), Guridi *et al.*, (1985); señalaron la importancia del análisis foliar en el cultivo de café para conocer la correlación suelo-planta-productividad, que permita tener información sobre la cantidad de nutrimentos disponibles en el suelo, con el objetivo de valorar si existen deficiencia o suficiencia de un elemento y poder hacer las correcciones en la fertilidad antes de que la planta entre en un estrés nutritivo, siendo Raju & Subramanian, (1969), quienes mencionaron que los contenidos foliares de N y P, reflejan satisfactoriamente los rendimientos del cafeto, recomendando que para el mantenimiento de niveles óptimos son necesarios adiciones de P y N para una buena producción. Señalaron también que el N y K, son los elementos que más se asocian a la cantidad de la producción, pero que la calidad de la bebida es perjudicada por la falta de P en la fertilización.

En el experimento, la alta correlación presentada entre el contenido P foliar y el P en el suelo, son resultado de los tratamientos elevados de P que fueron necesarios para un mejor nivel foliar, ya que como se discutió en el apartado sobre los suelos volcánicos, la deficiencia de P es consecuencia de la dinámica de la fijación de este elemento en los suelos derivados de cenizas volcánicas, tal como lo han confirmado las investigaciones reportadas por Fassbender, (1966, 1968, 1969, 1975); Fassbender *et al.*, (1967, 1968, 1969, 1978, 1987); Bravo, (1974); Martini, (1969); Hawai, (1980); Ramos, (1982); Ramos *et al.*, (1984); Quantin, (1986); Canesa *et al.*, (1987); Sánchez *et al.*, (1990); Fixen, (1994); Alvarado *et al.*, (2001); Fernández, (2001); Zheng, (2002); Saber *et al.*, (2003); Toor, (2004); Vázquez *et al.*, (2004); Zhang *et al.*, (2004); Giesler *et al.*, (2005); Torber *et al.*, (2005), quienes han puesto especial importancia a éste elemento, pues es sabido que las condiciones del suelo tienen influencia decisiva en la disponibilidad y aprovechamiento del P, como sucede en los suelos estudiados, por lo que se torna crítico cuando las cosechas son abundantes y la cantidad de P es insuficiente.

6.7.3. CORRELACIONES DE P EN CAFÉ ORO

Las correlaciones positivas fueron entre:

P café oro-P en el suelo	(0.8030)
P café oro-P foliar	(0.6740)

El coeficiente de correlación entre los tratamientos y porcentajes de P café oro con los suelos y en el nivel foliar tienen un coeficiente de correlación alto de 0.8030 y 0.6740 respectivamente.

La respuesta de los tratamientos elevados de P en el café oro para correlacionar positivamente con el nivel de P en el suelo y foliar son consecuencia de la fijación de P en los suelos derivados de cenizas volcánicas. Así lo muestran las investigaciones reportadas por los autores anteriormente citados en Fassbender, (1966, 1968, 1969, 1975); Fassbender *et al.*, (1967, 1968, 1969, 1978, 1987); Martini, (1969); Bravo, (1974); Hawaii, (1980); Ramos, (1982); Ramos *et al.*, (1984); Quantin, (1986); Canesa *et al.*, (1987); Sánchez *et al.*, (1990); Fixen, (1994); Alvarado *et al.*, (2001); Fernández, (2001); Saber *et al.*, (2003); Toor, (2004); Vázquez *et al.*, (2004); Zhang *et al.*, (2004); Giesler *et al.*, (2005); Torber *et al.*, (2005).

La alta correlación encontrada de P café oro-P en el suelo de 0.8030, demuestra la respuesta y el efecto de los tratamientos con altas dosis de P aplicados, tanto de RF como con SFT. Tal como se discutió anteriormente, la gran deficiencia de este elemento en los suelos utilizados se reflejó en los escasos niveles absorbidos en el café oro obtenidos tanto en los testigos como en los tratamientos que no contenían P o con las de dosis bajas. Las medias de dichos tratamientos presentaron solo 0.09 mg g⁻¹ de P para el testigo, mientras que los que contenían dosis bajas mostraron un 0.12 mg g⁻¹, siendo los tratamientos con altas dosis de P los que llevaron el contenido hasta 0.237 mg g⁻¹ de P, nivel considerado alto y suficiente para café oro. Con lo anterior se demostró una clara deficiencia de este elemento originado por los bajos contenidos en estos suelos y la necesidad de la fertilización fosfatada.

El café oro es la semilla o grano, es el producto final y comercializable en este cultivo, por lo que la alta correlación encontrada con el suelo, señala la importancia de conocer mejor la dinámica del P en estos suelos para establecer el manejo adecuado de la fertilización con las dosis necesarias para llegar a los niveles de suficiencia de estos elementos en suelos fijadores de P.

Finalmente, el café oro desde el punto de vista de la comercialización y mercado, este es el producto más importante y junto a factores físicos y químicos en el proceso de beneficio, la variedad de café, la torrefacción y molienda, liberarán los productos finales de este grano sintetizados en el aroma, cuerpo, color y sabor de la bebida (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Jácome, 1980, Valencia, 1999).

6.7.4. CORRELACIONES DE P EN PULPA DE CAFÉ

Las correlaciones positivas fueron entre:

P pulpa-P en suelo	0.7367
P pulpa-P foliar	0.6671
P pulpa-P café oro	0.8286

Las correlaciones del P en pulpa, con P en suelo, en foliar y en café oro fueron altas y positivas: 0.7367, 0.6671, 0.8286, respectivamente. La más alta fue con café oro.

Tal como se señaló en el apartado sobre pulpa de café, al inicio del experimento, las cantidades de este elemento para el testigo eran de sólo 0.074 %, valor considerado muy bajo, lo que significa una deficiencia de este elemento, mientras que para los tratamientos con dosis bajas fueron de 0.15 mg g⁻¹ de P, siendo los tratamientos que estadísticamente dieron los valores más altos con los tratamientos 18-20-12, tanto con RF como con SFT elevando las concentraciones de P en la pulpa en 0.24 mg g⁻¹ y 0.18 mg g⁻¹ respectivamente, lo cual sugiere la necesidad de una adecuada fuente de P para estos suelos, tal como lo señalan varios autores como Fassbender, (1966, 1968, 1969, 1975); Fassbender *et al.*, (1967, 1968, 1969, 1978, 1987); Haarer, (1977); Coste, (1978); Licon, (1979); Malavolta, (1981); Bravo, (1984); Fixen, (1990); Fixen, (1994); Alfaro *et al.*, (1998); Chavarría *et al.*, (1999); Ramírez *et al.*, (1999); Valencia, (1999), Tal como se señaló, a nivel de las correlaciones ésta fue más alta en café oro (0.8286), le sigue pulpa con el nivel P en el suelo (0.7367) y al final con el nivel foliar (0.6671), por lo que se pone de relevancia la necesidad de un aporte suficiente de P junto al NK en café en suelos altamente fijadores de P.

La alta correlación del P pulpa-P café oro, muestra la estrecha relación de este elemento en el fruto o cereza de café, ya que la pulpa, llamado también epicarpio y mesocarpio del fruto representa alrededor del 60% del peso de la cereza de café (Jácome, 1980) y se reporta alto en P y otros nutrimentos importantes como N, K, Ca, Mg, Mn (Carvajal, 1972 1984; Calle, 1977; Coste, 1978).

La pulpa de café representa alrededor de la mitad del volumen de la cosecha de café por lo que se señala como un subproducto altamente importante en la cafecultura, debido a los aportes nutricionales en P y por otros macro y micronutrimentos. Sin embargo, tal como se demostró en el experimento, altas concentraciones de P en la pulpa de café se correlacionan con los altos tratamientos de P en estos suelos para lograr los niveles de suficiencia de acuerdo a Calle, (1977); Haarer, (1977); Coste, (1978); Jácome, (1980); Carvajal, (1984).

6.7.5. CORRELACIONES DEL P EN PERGAMINO DE CAFÉ

Las correlaciones positivas fueron entre:

P pergamino-P en suelo	0.7612
P pergamino-P foliar	0.6621
P pergamino-P café oro	0.8372
P pergamino-P pulpa	0.7561

Aunque los contenidos de P en el pergamino de café son muy bajos, de todas formas, se observa correlaciones positivas y altas, principalmente en café oro (0.8372), seguida por el pergamino y P en el suelo (0.7612), pergamino y P en pulpa (0.7561), y pergamino y P foliar (0.6621).

El pergamino es la delgada y dura cáscara que envuelve al grano de café, formado por material celulósico, pobre en nutrientes, la que finalmente es removida en el trillado del grano, y representa un 12.6% del fruto (Carvajal, 1972, 1984; Haarer, 1977; Coste, 1978; Jácome, 1980; Valencia, 1999). Siendo la envoltura de la semilla en café oro, se presenta una alta correlación P pergamino-P café oro de 0.8372.

Así mismo, estos efectos están relacionados con los incrementos del contenido de P en los tratamientos durante los cinco años del experimento como se citó en la discusión, siendo en el pergamino los mejores tratamientos aquellos que tuvieron las más altas dosis de P, 18-20-12 tanto con RF como con SFT. Este subproducto del café ha sido señalado desde el punto de vista de su utilidad como pobre en nutrimentos, por diversos autores como Uribe y Henao, (1981); Monroy, (1981); Carvajal, (1984); Gallardo *et al.*, (1988); Fischersworing y Roßkamp, (2001); Rivero *et al.*, (2001); Salas *et al.*, (2001); Soto *et al.*, (2002); Hirzel, (2004), quienes señalaron que la escasez de P en éste subproducto, aunado a bajos contenidos en N, mantienen en una condición desfavorable el pergamino para abono orgánico, comparado con la pulpa de café.

6.6.2 EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE P EN PERGAMINO DE CAFÉ

En el cuadro 47, se observa que el resultado del análisis de varianza es significativo y en el cuadro 50, se observa la prueba de Tukey donde las diferencias entre tratamientos son muy significativas y en la figura 82, se observa el comportamiento de P en las dos épocas de muestreo.

Cuadro 50. Prueba de Tukey para comparación de medias de los tratamientos y contenidos de P en pergamino de café en los cinco años de aplicación.

Años de aplicación de tratamientos				Cuadrado de las medias P (mg g ⁻¹)
5	A			0.06304167
4		B		0.05545833
3		B	C	0.05283333
2		B	C	0.04929167
1			C	0.04904167

Nota: 1,2,3,4,5 son los años de los experimentos.

*Tratamientos con la misma letra son estadísticamente equivalentes

En la figura 82, se muestra el comportamiento de las concentraciones de P en pergamino de café durante los cinco años que duró el experimento. Las medias de los tratamientos van de 0.049 mg g⁻¹ para el primer año y 0.063 mg g⁻¹ para el quinto año, tanto con el SFT como con RF.

En las figuras 82 y 80, se muestra la tendencia de los valores de pergamino de café durante los cinco años del tratamiento y en las dos épocas del año.

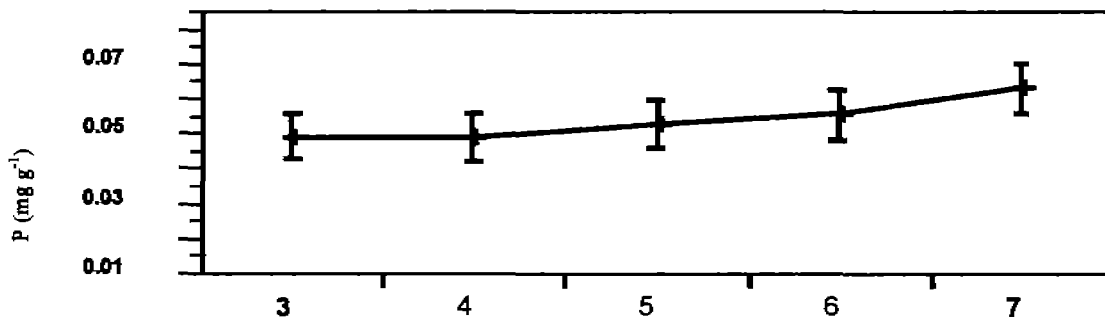


Fig. 82. Efecto del contenido de P en pergamino de café en cinco años por efecto de los tratamientos aplicados al suelo.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un experimento de campo sobre suelos volcánicos andisólicos fijadores de P y cultivados con café, de la Zona Soconusco, Estado de Chiapas, con el objetivo de evaluar el comportamiento del P, usando diferentes fuentes y dosis de este nutrimento.

Se encontró una gran deficiencia en P, al determinar las propiedades físicas y químicas en estos suelos volcánicos. La concentración de P en el suelo mostró claras relaciones con la naturaleza volcánica y sus propiedades químicas. El suelo fue clasificado como un Andisol, Suborden Umbrandept.

Para conocer la problemática y dinámica del P en estos suelos, se comparó la eficiencia de dos fuentes de P: Roca Fosfórica (RF) y Superfosfato Triple (SFT), través de la aplicación de 10 tratamientos en fórmulas completas NPK, un tratamiento con abono orgánicos y un testigo, siendo las dosis, fuentes de P y épocas de aplicación durante cinco años, las variables sobre los contenidos en suelos, foliar, pulpa de café, café oro y pergamino.

Con relación a la fuente de P, los mejores tratamientos se obtuvieron con las mayores dosis de P soluble, que en el presente experimento fue el SFT. Sin embargo, al final del experimento el mejor efecto residual en suelos fue con la RF utilizada, lo cual representa una ventaja para los cultivos perennes en estos suelos fijadores de P.

Las fuentes fosfatadas de los tratamientos SFT y RF incrementaron significativamente y en forma lineal la absorción a nivel foliar, en café oro, pulpa y pergamino, al mismo tiempo que en el suelo también se elevó su contenido. La limitación fue mayor con las dosis bajas en los tratamientos aplicados, con el abono orgánico utilizado (estiércol), y con el testigo, los cuales incorporaron la menor cantidad de este elemento

Al determinar el efecto de las dos fuentes de P en las variables analizadas, conforme al análisis estadístico de los resultados del experimento y el contenido de P en los suelos a través del procedimiento de Tukey, se encontró diferencias significativas en el contenido de P aprovechable al comparar los tratamientos y las fuentes entre si.

Se obtuvieron respuestas significativas con las dosis más altas de P empleadas en los tratamientos. Se vieron correlacionados los tratamientos con mayores concentraciones de P en suelos y en los productos analizados de la planta de café, (foliar, pulpa de café, café oro y pergamino).

Hubo diferencias significativas en la concentración de P soluble extraído, siendo menor la concentración en el testigo y en los suelos que no recibieron los tratamientos, en los que recibieron bajas dosis y los tratamientos con abono orgánico, siendo la falta de este nutrimento un factor limitante para la producción de cultivos. El valor promedio fluctuó entre $5.0 \mu\text{g g}^{-1}$ y $46.29 \mu\text{g g}^{-1}$ como limite inferior y superior respectivamente.

Las dosis de las fuentes fosfatadas influyeron en la cantidad incorporada de éste elemento durante los cinco años del experimento, ya que se encontraron valores altos estadísticamente significativos en el contenido de este elemento en suelos y en los productos analizados de la planta, con los tratamientos conteniendo dosis altas de P, lo que revela la necesidad de equilibrar éste elemento dentro de las fórmulas convencionales NPK en el cultivo de café.

La planta de café respondió significativamente a los tratamientos con P, evaluadas en las respuestas del nivel foliar, café oro, pulpa y pergamino y se refleja en las altas correlaciones encontradas

En cuando a la concentración del P en la planta, en el café oro fue más alto, éste más alto que la pulpa, luego en el nivel foliar y el de menor proporción en el pergamino, como se muestra en el siguiente orden

P café oro > P pulpa > P foliar > P pergamino.

El comportamiento del P durante los cinco años y en las cuatro épocas del año fueron evaluadas, habiendo resultado correlaciones positivas a las aplicaciones de P, los cuales elevaron contenidos en los subproductos del café y en el suelo. Los contenidos de P en los subproductos del café, fueron más elevados en las épocas de septiembre y diciembre, lo que está relacionado con las épocas de mayor precipitación en la zona y por tanto en las etapas de mayor absorción y demanda de P para la fructificación durante el año. Esta dinámica se mantuvo durante cinco años.

En el presente experimento, se comprobó el efecto residual de las fuentes fosfatadas utilizadas después de cinco años de aplicación y confirmó que la roca fosfórica (RF) es la de mejor residualidad, seguido por el superfosfato triple (SFT). Estas fuentes han sido empleadas en suelos ácidos y en suelos volcánicos.

El tratamiento orgánico no respondió significativamente en las variables estudiadas suelo-café y su respuesta fue cercana a los tratamientos con bajo contenido de P.

Se presentaron correlaciones altas entre los contenidos de P y las variables suelo-planta-café, siendo las más altas en P suelo-P café oro; P café oro-P pulpa.

Los resultados del presente experimento permitieron conocer la disponibilidad del P en estos suelos, la dinámica y la forma en que estos son aprovechados por las plantas de café.

CAPITULO 8. LITERATURA CITADA

- Aduayi, E.A. 1972. The role of phosphorus on the growth and mineral nutrient composition of young arabica coffee grown in sand culture. *Kenya Coffee*:336-340.
- Aguilera, H.N. 1969. Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Mexico. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica. A.6.1-12.
- Aguilera, H.N. 1965. Suelos de Ando, Génesis, Morfología y Clasificación. Serie de investig. No. 6. E.N.A. Colegio de Posgraduados, Chapingo, Méx.
- Alcalá De Jesús, M., Ortiz Solorio, C.A., Gutiérrez Castorena, M. del C. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Rev. Terra*. Vol. 19(3):227-239.
- Alfaro Araya., R y Fonseca Castro, C. 1998. Dosis, fuentes y formas de aplicación de fósforo al suelo en dos suelos cafetaleros... En Memoria IV Seminario Resultados y Avances de Investigación InfoAgro. p. 1-9.
www.infoagro.go.cr/tecnologia/cafe98.html
- Almeida, A.M. y Bornemisza, E. 1977. Efecto del encalado sobre las cargas eléctricas y otras propiedades químicas de tres Inceptisoles de Costa Rica. *Turrialba*. 27(4):333-342.
- Alegre, J.C. y Chumbimune, R. 1991. Investigaciones y usos de la roca fosfórica en el Perú. II Reunión de la Red Latinoamericana de Roca Fosfórica. Venezuela. 13-16 marzo. Memoria.
- Alvarado H., A... Bertsch H., F., Bornemisza S., E, Cabalceta A., G., Forsythe H., C., Mata Ch, R., Molina R., Eloy y Salas C., R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. 1a Ed. San José C.R.: 112 pp.
- Alvarado, A., and S. Buol. 1985. Field estimation of phosphate retention by Andepts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:911-937.
- Álvarez-Sánchez, J y Naranjo-García, E. 2003. Ecología del Suelo en la Selva Tropical Húmeda de México. Edits. 2003. UNAM-Fac de Ciencias. Instituto de Ecología, A.C. pp 302.
- Amorin, H.V. 1973. Estudos sobre a alimentacao mineral do cafeeiro XXVII. Efeito da adubação N, P, e K no teor, de macro e micro nutrientes do fruto e na qualidade da bebida do café. *Anáís da Escola Superior da Agricultura "Luiz de Queiroz"* (Brasil) 30:323-333.
- ASERCA. 2002. Situación actual del mercado internacional de café.2002. DGOF. 8 p.

- Atia, A.M. and Mallarino, A.P. 2002. Agronomic and environmental soil phosphorus testing in soils receiving liquid swine manure. *Soil Science Society of America Journal* 66:1696-1705
- Barrow, N.J. 1979. The description of desorption of phosphate from soil. *Journal of Soil Sci.* 30:259-270.
- Barrow, N.J. and Shaw, T.C. 1979. Effects of ionic strength and nature of the cation on desorption of phosphate from soil. *Journal of Soil Sci.* 30:53-65.
- Bartlett, R.J. and Riego, D.C. 1972. Toxicity of hydroxy aluminum in relation to pH and phosphorus. *Soil Science.* 114(3):194-200.
- Beck, M., W. Robarge, and S. Buol. 1998. Phosphorus retention and release of anion and organic carbon by two Andisols. *J. of Soil Sci.* 50:157-164.
- Benítez, J.R. 1983. Manejo de fósforo en suelos ácidos e infértiles de la Amazonía Peruana. 1a. Conferencia Latinoamericana de Roca Fosfórica. Cochabamba, Bolivia. p. 471-500.
- Bingham, F.T. 1973. Phosphorus. In: *Diagnostical Criteria for plants and soils.* Riverside California. pp 324-361.
- Birrel, K.S. 1964. Some properties of volcanic ash soils. *FAO. World Soil Resources Report No. 14:*74-81.
- Black, C.A. 1965. *Method of Soil Analysis.* Amer. Soc. of Agronomy 2-9.
- Black, C.A. 1975. Fósforo. In *Relaciones Suelo-Planta.* Tomo II. Ed. Hemisf. Sur. P. 613-715.
- Blackemore, L.C., Searle, P.L., and Daly, B.K... 1981. *Soil Bureau Laboratory Methods. A method for chemical analysis of soils.* DSIRO, New Zealand. 56 pp. (New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10A).
- Blanco, M., Hagggar, J., Moraga, P., Madriz, J. del C. y Pavón, G. 2003. Morfología del café (*Coffea arabica L.*) en lotes comerciales. *Nicaragua. Agronomía Mesoamericana* 14(1):97-103.
- Besoain, M. E., Peralta P. M., Massaro M., S. 2000. Mineralogía y génesis de algunos suelos de cenizas volcánicas de Chiloé Continental, Chile. *Agric. Técn.* 60(2):127-153.
- Borie, F. y Rubio, R. 2003. Fósforo total y fósforo orgánico en suelos volcánicos de Chile. *Gayana Bot.*, 2003, Vol.60, no.1, p.69-73.
- Bornemisza, E. E Igue, K. 1967. Óxidos libres de hierro y aluminio en suelos tropicales. *Turrialba* 17(1):23-30.

Bornemisza, E., Laroche, A., and Fassbender, H.W. 1969. Effects of liming on some chemical characteristics of a Costa Rican Latosol. *Soil and Crop Sci. Soc. Florida* 17:216-219.

Bray, H.W. and Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, Organic and Available forms of phosphorus in Soils. *Soil Sci.* 59(1):39-45.

Bravo, G.E. 1984. Fertilidad de los Suelos cafeteros y fertilización del cafeto en Colombia. *Suelos Ecuatoriales*. Vol. XIV(1):362-377.

Bravo, G. E. y Gómez, A.A. 1974. Capacidad de fijación de fósforo en seis unidades de suelos andosólicos de la Zona cafetera colombiana. *CENICAFE*, Vol. 25(1):19-29.

Breedlove, D.E. 1981. Introducción a la Flora de Chiapas. *Flora de Chiapas, Parte 1. Académica de Ciencias de California, USA*. 34 pp. En: *Lecturas Chiapanecas 6*. Gob. Del Edo. de Chiapas. 1993. pp 2910-356.

Bromfield, S.W. 1970. The inadequacy of corrections for resorption of phosphate during the extraction of aluminium-bound soil phosphate. *Soil Sci.* 109(6):388-390.

Buckman y Brady. 1977. El abastecimiento y aprovechamiento del fósforo y potasio. In *Naturaleza y Propiedades de los Suelos*. Ed. Montaner y Simon, S.A. Barcelona. p. 450-466.

Bunemann, E.K., Steinebrunner, F., Smithson, P.C., Frossard, E. and Oberson, A. 2004. Phosphorus dynamics in a highly weathered soil as revealed by isotopic labeling techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1645-1655.

Calle V., H. 1977. Subproductos del café. *Boletín técnico No. 6*. CENICAFE. 84 pp.

Campos Cascaredo, A., Oleschko, K., Cruz Huerta, L, Etchevers B., J.D. y Hidalgo, M.C. 2001. Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del Volcán Cofre de Perote. *Rev Terra*. Vol 19(2):105-116.

Canessa, J., Sancho, F y Alvarado A. (1987). Retención de fosfatos en Andepts de Costa Rica. I. Relaciones entre la retención de fosfatos, el pH en NaF y el aluminio activo. *Turrialba* Vol. 36(4):431-438.

Canessa, J., Sancho, F y Alvarado A. (1987). Retención de fosfatos en Andepts de Costa Rica. II. Respuesta a la fertilización fosfórica. *Turrialba* Vol. 37(2):211-218.

Carvajal, J.F. 1963. La toma de muestras foliares en cafetos para fines de diagnóstico. *Café*. IICA Turrialba Vol. 5(17):25-33.

Carvajal, J.F. 1972. *Cafeto, cultivo y fertilización*. 1ª. Edic. Inst Internacional de la Potasa. Berna Suiza. 180 pp

- Carvajal, J.F. 1984. Cafeto, cultivo y fertilización. 2ª. Edic. Inst Internacional de la Potasa. Berna Suiza. 239 pp
- Cavala, P. y Fassbender, H.W. 1970. Formas del fósforo en suelos de la región cacaoatera de Bahía, Brasil. Turrialba 20(4):439-444.
- Cenapred. 2004. Volcanes. Peligro y riesgo volcánico en México. Serie Fascículos. 51 pp.
- Chang, S.C. and Jackson, M.L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. 84(2):133-144.
- Chang, S.C. and Juo, S.R. 1964. Available phosphorus in relation to forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 95:91-96.
- Chebadi, A. y Goncalves, J.C. 1970. Deficiencias minerais no cafeeiro. Instituto Brasileiro do café. Boletim Técnico SCR No. 56. 28 p
- Carrasqueo, A. y Adams., M. 1994. Estudio del complejo amarillo vanadomolidofosfórico para el análisis de fósforo en suelos. Revista VENESUELOS 3(2):83-88
- Chapman, H.D. 1973. Diagnostical Criteria for plants and soils. Riverside California.
- Chavaria, E., Villalobos, C., y Chaves, M. 1999. Evaluación del efecto de 5 dosis de fósforo en un Inceptisol sobre la producción de caña de azúcar en un Inceptisol de Esparza, Puntarenas. XI Congreso Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos. Resumen 358.
- CID'IPT. Abonado con fosfato Thomas del cafeto, Te y Cacao. Centre Internacional D'Information des Producteurs de Phosphate Thomas Pub. Esp. 20 pp.
- Colonna, J.P. 1979. L'alimentation minerale du caféier Excelsa variabilité naturelle de la composition minérale foliaire sur une plantation homogene. Sér. Biol. No. 18: 69-80. Orstom.
- Córdoba, J.J. 1991. Roca fosfatada Napo como fuente de fósforo para cultivos de zonas altas de Ecuador. Rev Fac Agron (Maracay) 17:181-195.
- Coste, R. 1978. El café. Técnicas agrícolas y producciones tropicales. Edit. Blume. 285 pp.
- CONABIO. 1998. La diversidad biológica en México: Estudio de País, 1998. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- CONANP. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Tacaná-Boquerón. Rtp-135. 528-530 pp.

Covarrubias R., J.M., Castillo A., S., Vera N., J.A., Núñez E., R., Sánchez G., P., Avendaño S., R. and Peña C., J. 2005. Phosphorus uptake and use efficiency by potato cultivar alpha ^{32}P using. *Rev. Agrociencia* 39(2):127-136.

Cuanalo, C.H. 1975. Manual para la descripción de perfiles de suelos en el campo. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México. 40 pp.

Cruz-Flores, G., Aviles Marin, S., y Cortés Castelán, J.C. Estudio de adaptabilidad de *Triticale* a diferentes dosis de calcio y fósforo en Andisoles. *Rev Terra*, 16(1):63-69.

Darlgren, R. et al. 1991. Soil forming a processes in Alic Melanudands Under japanese pampas grass and oak. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1049-1056.

Datta, N.P. , Shinde, J.W. and Kanath, M.B. 1962. Effect of sodium silicate on the uptake of soil and fertilizer phosphorus by wheat, rice and berseem. *Indian J. Agric. Sci.* 32:219.

De la Cruz-Reyna, S., Armienta, M.A., Zamora, V., Juarez, F. 1989. Chemical changes in spring waters at Tacana Volcano, Chiapas, Mexico: A posible precursor of the may 1986 seismic crisis and phreatic explosion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* Amsterdam Holanda. Vol.38:345-353.

Diario Oficial de la Federación. 2003. Decreto de Creación Área natural protegida. Región Volcán Tacaná. Presidencia de la República. Estados Unidos Mexicanos. pp 19-21.

D'Hoore, J. y Coulter, J.K. 1975. El silicio del suelo y la nutrición vegetal. In: *Suelos de las regiones tropicales húmedas.* Ed. Marymar. Arg. 269 p.

Doberman, A., George, T., and Thevs, N. 2002. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. *Soil Science Society of America Journal* 66:652-660.

Dunald, F. 1961. Nutrición del cafeto. *Rev. Cafetalera.* Oct-Dic.

Earl, K.D., Syers, J.K: y McLaughlin, J.R. 1979. Origin of the effects of citrate, tartrate and acetate on phosphate sorption by Soils and Synthetic Gels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:674-678.

Egawa, T. 1977. Properties of soils derived from volcanic ash. In: Y. Ishizuka y C.A. Black (ed.). *Soils derived from volcanic ash in Japan.* CIMMYT, México. D.F. PP.11-64.

Ellies, S.A., McDonald, H.R. y Vyhmeister, S.E. 1979. Efecto de aplicaciones de CaO sobre la humectación y disponibilidad de fósforo en suelos de cenizas volcánicas. *Agro Sur* 7(2):51-56.

Escudey, M., Galindo, M, Avendaño, K. et al. 2004. Distribution of phosphorus forms in chilean soils and sewage sludge by chemical fractionation and ^{31}P -NMR. *J. Chil. Chem. Soc.*, Vol.49 (3):219-222.

Espinosa, J. 1991. Efecto residual de fósforo en Andisoles. Rev. Fac Agron (Maracay) 17:39(5).

Etchevers, J.D., Núñez E., R., Montes G., I y Trinidad S. A. 1986. Investigación agronómica con roca fosfórica en México. Serie Cuadernos de Edafología 3. Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados, Chapingo, Mex. 47 p.

FAO-ISRIC-SICS. 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 8. FAO. Rome.

FAO-UNESCO-ISRIC. 1988. Mapa mundial de Suelos. Leyenda Revisada. Roma. Italia. 119 p.

FAO, 1991. World soil resources. Food and Agricultura Organización of the United Nations, Rome, Italy, 58 pp. (World Soil Resources Report No. 66).

FAO. 2002. Los fertilizantes y su uso. Asoc Internac. de la Industria de los Fertilizantes. 4ª. Edición. 87 pp.

FAO, 2004. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. Fertilizer and plant nutrition Bull 13. 196 p.

Fassbender, H.W. 1969. Estudio del fósforo en suelos de América Central. IV. Capacidad de Fijación de fósforo y su relación con características edáficas. Turrialba 19(4):497-505.

Fassbender, H.W. 1969. Deficiencias y fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en Centroamérica. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica. p. 1-10.

Fassbender, H.W. 1966. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evolución usando las isotermas de Langmuir. Fitotecnia Latinoamericana. 3:203-216.

Fassbender, H.W. 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, IICA. P. 207-268.

Fassbender, H.W. 1968. Phosphate retention and the different chemical forms under laboratory conditions from 14 Costa Rican Soils. Agrochimica 12(2):9-13.

Fassbender, H.W., Beinroth, F.H. y Sarmiento, L.S. 1978. Amounts and forms of phosphorus in ten highly weathered soils of Puerto Rico. Turrialba 28(2):9-13.

Fassbender, H.W., Bornemisza, E. 1987. Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Editorial IICA, San José, Costa Rica. 420 p.

Fassbender, H.W., e Igue, K. 1967. Comparación de métodos radiométricos y colorimétricos en estudios sobre retención y transformación de fosfatos en suelos. Turrialba 19(3)368:374.

Fassbender, H.W. y Müller, L. 1967. Use of silicate amendments in soil of high phosphorus-fixing capacity. I. Effect of sodium metasilicate applications. Turrialba 17(4):371-378.

Fassbender, H.W. y Müller, L. 1969. Uso de enmiendas silicatadas en suelos altamente fijadores de fosfatos. II. Efecto de fertilizantes silicofosfatados. Turrialba 19(3):373-378.

Fassbender, H.W. y Molina, R. 1969. Influencia de enmiendas calcáreas y silicatadas sobre el efecto de fertilizantes fosfatados en suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica. 8(3)1-17.

Fassbender, H.W., Müller, L. Y Balerdi, F. 1968. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y su relación con las plantas. Turrialba 18(4):333-347.

Fernández López, C., Vázquez, S., Dalurzo, H.C. Y Moral, L.A. 2001. Índice de disponibilidad del fósforo proveniente del fertilizante en suelos de la Provincia de Misiones, Argentina. Rev Agricultura Técnica. INIA. Vol. 61(2):229-234.

Fernández López, C., Vázquez, S., Dalurzo, H.C. 2000. Caracterización del fósforo en Oxisoles de Misiones. Com. Cient y Tecnológicas. Univ Nal. Del Nordeste, Arg. 4 p.

Fernández P., L.L.: 1981. Evaluación de invernadero de las rocas fosfórica de Baja California Sur mezclada con abonos orgánicos en suelos de Ando de la Meseta Tarasca. Tesis Biólogo. Fac. de Ciencias, UNAM.

Infopos. Fertilizantes fosfatados. North American PPI Program. 10 p.

Fischersworing, H. y Roßamp R., R. 2001. Guía para la caficultura ecológica. GTZ Org. Rep. Alemania. 150 p.

Fixen, P. 1994. Dinámica del fósforo en el suelo y en el cultivo en relación al manejo de los fertilizantes fosfatados. Instituto de la Potasa y el Fósforo, Quito, Ecuador. 10 p.

Fixen, P. 1994. Dinámico suelo-cultivo del fósforo y manejo de los fertilizantes fosfatados. (parte II). Informaciones Agronómicas, Instituto de la Potasa y el Fósforo. Quito, Ecuador (17):9-12.

Fixen, P.E. and Grove, J.H. 1990. Testing soils form phosphorus. In Soil Testing and Plant Analysis, 3rt Ed SSSA Book Series No. 3. Soil Sc. Soc Amer. Madison, WI.

Fischersworing H. y Roßkamp R., R. 2001. Guía para la caficultura ecológica. Org GTZ. Rep Alemania. 150 p.

Flores, M., Bratescu, A., Martinez, J.O, Oviedo, J.A., Acosta, A. 2002. Centroamérica: el impacto de la caída de los precios de café. Serie Estudios y perspectivas No. 9 CEPAL. Subsele regional México. 83 p.

Fonseca, C. C. 1997. Fuentes, niveles y formas de aplicación de fósforo al suelo Infoagro. 7 p.

Fonseca Castro, C.M. 1998. Fuentes, niveles y formas de aplicación de fósforo al suelo. Memoria IV Seminario resultados y avances de investigación. InfoAgro. 7 p.

Forsythe, W.M., Gavande, S.A. y González, M. 1969. Propiedades físicas de suelos derivados de cenizas volcánicas. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica. 8-3(1-17).

Gallardo-Lara, F., Delgado Calvo Flores, R., y Nogales, R. 1988. Incidencia de la aplicación de un compost y diferentes complementos minerales sobre la disponibilidad de fósforo para la planta. Turrialba Vol. 38(2):137-142.

Gamboa, J. Y Blasco, L.M: 1976. Dinámica del fósforo en el suelo después de cinco fertilizaciones consecutivas. Turrialba 26(2):150-155.

García, F.O. 2002. Criterios para el manejo de la fertilización fosfatada del cultivo de maíz. Infopos/PPI/PPIC/Cono Sur. Arg.

García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática Koeppen . Segunda edición, Instituto de Geografía, UNAM, México. 246 p.

García, E. and CONABIO. 1998. Climas. Clasificación climática de Koeppen, modificado por García. Escala 1:1,000,000. México. (www.conabio.gob.mx).

García, E. 1984. Modificaciones AL sistema de clasificación climática de Koepen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). FOCET Larios, México, D.F., 71 p.

García, F.O y Picone, L.I. 2003. Actas Simposio "El fósforo en la agricultura Argentina". INFOPOS. 9 p.

Gichuru, M.P. y Sánchez, P.A. 1988. Phosphate rock fertilization in tilled and no-till low-input systems in the humid tropics. *Agronomy Journal* Vol. 80 (6):943-947.

Giesler, R., Andersson, T., Lovgren, L., and Persson, P. 2005. Phosphate sorption in aluminum and iron rich humus soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:77-86.

Griffith, L. 1985. El fósforo. *Rev. Agricultura de las Américas.* 35(9):16-21.

Guerrero, R.R., Burbano, H.J., y Cabrera, G.T. 1972. Estado y fijación del fósforo en suelos volcánicos del Sur de Colombia. II Panel sobre suelos volcánicos de América Latina. Pasto, Colombia. p. 59-81.

Guridi, F y Vento H. 1985. Estudio preliminar de la influencia del fósforo sobre la materia seca y algunas formas de este elemento en las hojas de cafeto, así como sobre el crecimiento radical de este. *Cultivos Tropicales*. La Habana. Vol. 7(4):93-99.

Guridi, F. y Vento, H. 1985. Influencia de la fertilización fosfórica en la distribución del fósforo contenido en hojas de *Coffea arabica* L. (variedad Caturra) en dos momentos fisiológicos de este cultivo. *Cultivos Tropicales*, La Habana. Vol. 7(4):75-81.

Gutiérrez Zamora, G. 1978. Manual de recomendaciones para cultivar café. *Rev Cafetalera Anacafé*. 179:23-40.

Haarer, A.E. 1977. Producción moderna de café. Edit. CECSA. 625 p.

Herrera, T. y Cassanova, E. 1994. Efecto de las características de suelos y rocas fosfóricas sobre el fósforo disponible. *Revista VENESUELOS* 5 (1 y 2):34-39

Helbig, C. 1964. El Soconusco y su zona cafetalera en Chiapas. 1ª. Edic. Trad. Inst. de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. 133 pp.

INE-INEGI. 1996. Uso de Suelo y Vegetación. 1:1,000,000. Instituto Nacional de Ecología. DOE.

Hiroce, R. 1981, Diagnose foliar em cafeeiro. En: *Nutrição e adubção do cafeeiro*. Instituto da Potassa & Fosfato p 118-137.

Hirzel ,J., Rodríguez, N., y Zagal, E. 2004. Effect of different doses of NPK inorganic fertilization and organic source on maize productions and soil fertility. *Agric Tec Chile*. V. 64(4).

Holford, I.C.R. y Patrick Jr. W. H. 1979. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid Soil. 43:292-297.

Holford, I.C.R. 1997. Soil phosphorus its measurement and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.* 35:227-239.

Hsu, P.H. 1979. Effect of phosphate and silicate on the crystallization of gibbsite from OH-Al Solutions. *Soil Sci.* 127(4):219-226.

Hsu, P.M. 1965. Fixation of phosphate by aluminum and iron in acid soils. *Soil Sci.* 99(6):398-402.

ICOMAND. 1986. Internacional Comité on the Clasification of Andisols. Circular letter No. 8.

Inmecafé, 1990. El cultivo del cafeto en México. Edic. Inmecafé-Nestlé, Xalapa, Ver. 28 p.

INPOFOS, 2005. El Instituto de la Potasa y el fósforo en México y Norte de Centroamérica. INPOFOS. www.inpofos.org

ISSS, ISRIC y FAO. 1994. World referente base for soil resources (Draft). International Society of Soil Science. International Soil Referente and Information Centre and Food an Agricultural Organization of the United National, Wageningen/Rome, 161 p.

ISSS; ISRIC; FAO. "World reference base for soil resources". FAO. 91 pp. Roma, 1998.

Izquierdo Al., D. 1964. El fósforo, nutriente vegetal. Tesis Prof. Univ. Iberoamericana. Fac. Ciencias Químicas. 58 p.

Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Barcelona. Ed. Omega. 662 p.

Johnston, A.E. 2000. Soil and plant phosphate. Intern Fertilizer Industry Assoc. Paris. 54 pp.

Jácome O., B. 1980. Estudio sobre el aprovechamiento integral de algunos subproductos del café. Monografía recepcional. Univ Veracruzana. Fac. Ciencias Químicas. 111 p.

Jiménez, E. 1980. Comparación de la producción de materia orgánica de un bosque caducifolio y el cafetal. In: Memorias 1er Simposio-Estudios Ecológicos en el Agroecosistema Cafetalero. Xalapa, Veracruz. Edit. CECOSA. 98 p.

Jiménez, O.H. 1980. Guía para muestreo foliar en fincas de café. ANACAFE. Vol. 5:4-8 p.

Jones, J.P. y Fox, R.L. 1978. Phosphorus nutrition of plants influenced by manganese and aluminum uptake from an oxisol. *Soil Sci.* 126(4):230-236.

Juo, A.S.R. y Ellis, G.B. 1968. Chemical and physical properties of iron and aluminum phosphates and their relation to phosphorus availability. *Soil Sci. Soc. of Amer. Proc.* 32(2):216-221.

Kanehiro, Y Mikami, D.T. 1972. Some exchange adsorption and fixation properties of amorphous volcanic ash soils of Hawaii. II Panel sobre suelos volcánicos de América Latina, Pato, Colombia. P.39-58.

Kanwar, J.S. 1966. Phosphate retention by some Australian Soils. *Soil Sci.* 82(1):43-50.

Kawai, K. 1980. The relationship of phosphorus adsorption to amorphous aluminum for characterizing andosols. *Soil Sci.* 129(3):186-190.

Klatt, J.G., Mallarino, A.P.; Downing, J.A., Kopaska, J.A. and Wittry, D.J. 2003. Soil phosphorus, management practices and their relationship to phosphorus delivery in the Iowa Clear Lake agricultural watershed. *J. Environ. Qual.* 32:2140-2149.

- Kleinman, P.J.A., Needelman, B.A., Sharpley, A., and McDowell, R.W. 2003. Using soil phosphorus profile data to assess phosphorus leaching potencial in manured soils. *Soil Science Society of America Journal* 67:215-224.
- Lair, R. 1984. 25 Años de investigación agrícola de la Sierra Tarasca en el Estado de Michoacán. En: Trinidad, S.A., Miranda, J.O. Los suelos de Ando y sus implicaciones en el desarrollo agrícola de la Sierra Tarasca. 2ª. Edición, Colegio de Postgraduados, México.
- Leal, N., y Madrid de Cañizalez, C. Compostaje de residuos orgánicos mezclados con roca fosfórica. *Agron. Trop* 48:335-357.
- Licona F., R. 1979. Fertilización del cafeto en México. En: II Simposio Latinoamericano sobre caficultura. Memorias. IICA-OEA-PROMECAFE. Xalapa, Ver. p. 55-64
- Litaor, M.I., Reichmann, O., Auerswald, K., Haim, A., and Shenker, M. 2004. The geochemistry of phosphorus in peat soils of a semiarid altered wetland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:2078-2085.
- Lott, W.L., Nery, J.P., Gallo, J.R. y Medcalf, J.C. 1956. La técnica del análisis foliar en los estudios del café. Instituto IBEC de Investigaciones Técnicas del Instituto Agronómico de Campinas Brasil. Publ No. 9:28 p.
- López-Hernández., Flores, D., Siegert, G. y Rodríguez, J.V. 1979. The effect of some organic anions on phosphate removal from acid and calcareous soils. *Soil Sci.* 128(6):321-326.
- López, M. 1969. Problemas de fertilización en suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Centro de Enseñanza e Investig. Turrialba, Costa Rica. C.1.3-8-
- López R., y López M.J. 1978. Deficiencias Minerales. El diagnóstico de suelos y plantas. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. p. 248-249.
- Loué, A. 1962. Étude des carences et déficiences en potassium, calcium et magnésium chez le caféier Robusta. *Instit Français du café et du cacao. Bulletin* No. 4:48 p.
- Macías Vázquez, J.L. y Capra Pedol, L. 2005. Los volcanes y sus amenazas. Fondo de Cultura Económica. 159 p.
- Macías, J.L., Espíndola, J.M., García-Palomo, A., Scott, K.M., Hughes, S., Mora, J.C. 2000. Late Holocene Peléan-style eruption at Tacaná volcano, Mexico and Guatemala: Past, present, and future hazards. *Journal: Geological Society of America Bulletin* Vol:112:1234-1249.
- MAG. 1978. Manual de recomendaciones para cultivar café. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Oficina del Café. 3ª. Edic. San José, C.R. 67 p.

Maguire, R.O. and Sims, J.T. 2002. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with Mehlich 3. *Soil Science Society of America Journal* 66:2033-2039.

Malavolta, E. 1981. Nutrição e adubção do cafeeiro. –Passado, presente e perspectivas. En *Nutrição e adubção do cafeeiro*. Instituto da Potassa & Fosfato. p 138-178.

Malavolta, E. 1981. Nutrição e adubção do cafeeiro na América Central. En: *Nutrição e adubção do cafeeiro*. Instituto da Potassa & Fosfato. 213-224 p.

Malavolta, E., Yamada, T. y Guidolin, J.A. 1981. Nutrição e adubção do cafeeiro. Instituto da Potassa & Fosfato. 224 p.

Martini, J.A. 1969. Distribución y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Centroamérica. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica. A.5.1-19.

Matsumoto, H. and Hirasawa, E. 1979. Less involved of phosphorus deficiency in the inhibition of rool elongation of pea seedlings by aluminum. *Soil Sci. Plant Nutr.* 25(1):93-101.

Mehlich, A. 1968. Coffee nutrition and the possible use of compound fertilizers in Kenya. *Kenya Cofee*. Pp.59-65.

Mestre-Mestre, A. y Uribe-Henao, A. 1980. Dosis y frecuencia de aplicación del fertilizante en la producción de café. *CENICAFE*. Vol. 31(4):145-163.

Miranda, F. 1942. Estudios sobre la vegetación de México. II. Observaciones preliminares sobre la vegetación de la región de Tapachula, Chiapas. *Anales Inst. Biol. Univ. Nal. Autónoma de México*. 13:53-70.

Miranda, F. 1952. La vegetación de Chiapas, 1. Ediciones del Gobierno del Estado. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 334 p.

Miranda, 1953. La Vegetación de Chiapas, 2. Ediciones del Gobierno del Estado. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 426 p.

Miranda, F. 1957. Vegetación de la vertiente del Pacífico de la Sierra Madre de Chiapas (México), y sus relaciones florísticas. Instituto Botánico de Chiapas, pp.438-453. En: *Lecturas Chiapanecas* 6. Gob. Del Edo. De Chiapas. 1993.

Miranda, F. y Hernández X., E. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Bol. Soc. Bot. Mex.* 28:29-179.

Monge, L.F. 1999. Manejo de la nutrición y fertilización del cultivo del café orgánico en Costa Rica. XI Congreso Nacional Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos. 1999.

Montenegro, A. and Zapata, F. 2002. Rape genotypic differences in P uptake and utilization from phosphate rocks in an Andisol of Chile. Rev. Nutrient Cycling in Agrosystems. Pub Springer Science. Vol. 63(1):27-33.

Monroy, H.O., y Viniegra, G.G. 1981. Biotecnología para el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos. AGT Editor, S.A.

Montecinos, C. 1997. Manejo biológico del fósforo en el suelo. Rev.de CLADES. Núm esp 8/9. <http://www.clades.org>

Moraes, F.R.P. 1979. Fosfatos Industriais e naturais no desenvolvimento de cafeeiros novos. 7º Congreso Bras. De Pesq. Caf. pp.72-75.

Moraes, P, F.R. 1981. Adubção do cafeeiro. Macronutrientes e adubação orgânica. En: Nutrição e adubção do cafeeiro. Instituto da Potassa & Fosfato. 77-88.

Morillo, M.R. y Fassbender, H.W. 1968. Formas y disponibilidades de fosfatos de los suelos de la cuenca baja del río Choluteca, Honduras. Turrialba 18(1):26-33.

Muller, L.E. 1959. Algunas Deficiencias minerales comunes en el cafeto (*Coffea arabica* L.) IICA. Turrialba, C.R. 32 p.

Munns, D.N. 1965. Soil acidity and growth of a legume. II. Reactions of aluminum and phosphate in solution and effects of aluminum, phosphate, calcium and pH on *Medicago sativa* L. in solution culture. Australian Journal Agric. Res. 16:743-755.

Munns, D.N. 1965. Soil acidity and growth of a legume. III. Interaction of lime and phosphate on growth of *Medicago sativa* L. in relation to aluminum toxicity and phosphate fixation. Australian Journal Agric. Res. 16:757-766.

Muñoz Q., V.M. 1984. Importancia de la fertilización en el cultivo del café. Rev. Anacafé. No. 248:16-22.

Mulleried, F.C.G. 1957. Geología del Estado de Chiapas. México. UNAM. 72 pp.

Nazyo, M., Dahlgren, R. y Shoji, S. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in soil science 21. Elsevier. Amsterdam. pp: 145-187.

NCRS. 2000. Deficiencias nutricionales. Café y cítricos. Ressources Conservation Service. 4 p.

Navarro, I., Turrent, F.A., Laird, J.R., Ortega, T.E. 1962. Problemas de fertilidad en algunos suelos de la Sierra Tarasca. Agric. Tec. No. 12. S.A.G. México.

Noriega A.,G. y Etchevers, J. 1986. Hojas representativas del estado nutricional del cafeto (*Coffea arabica L.*) variedades Bourbon, Caturra y Mundo Novo. Res Sem "Efraín Hernández X". UACH. Chapingo, Mex. P. 12.

OEA. 1980. El café. Serie Mejores cultivos. Roma.35 p

Olson, R.A., y Engelstad, O.P. 1975. El fósforo y el azufre del suelo. In Suelos de las regiones tropicales húmedas. Ed. Marymar. Arg. 269 p.

Omotoso, T.I., Olojola, A. 1972. The effects of macro-nutrients on the growth and leaf composition of *Coffea canephora* Pierre. Turrialba. Vol. 22(1):53-60

Ortega E.J., y Guerrero, R.R. 1972. Comportamiento de las formas de fósforo y sus relaciones con la absorción de P por la avena, bajo tres fuentes de fertilización fosfatada en un suelo latosol de Nariño, Colombia. Turrialba 22(4):420-430.

Ortiz Mayén, O. 1978. Manual de suelos y fertilización de café. Rev Cafetalera. Guatemala. p 11-41.

Pacheco, R. y Carvajal, J.F. 1978. Fertilización fosfórica en dos suelos de Costa Rica. En: Resúmenes III Congreso Agronómico Nacional (Costa Rica). Vol. I. pp.8-85.

Palencia O., y Martini, J.A. 1970. Características morfológicas, físicas y químicas de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas en Centroamérica. Turrialba 20(3):279-287.

Palma, G. y Fassbender, H.W. 1970. Estudio del fósforo en suelos de América Central V. Uso de resinas de intercambio para evaluar la disponibilidad de P. Turrialba 20(3):279-287.

Palmieri, V., Cordero, A., y Moreira, M.A. 1986. Respuesta de la papa a la fertilización con nitrógeno y fósforo en la zona de Fraijanes, Alajuela. Agronomía costarricense. 10(1/2):111-120.

Parra, H.J. 1957. El análisis químico de las hojas de las plantas y su aplicación al cultivo de café. Rev Cafetera de Colombia. Vol. XIII(131):33-43.

Parra, H.J. 1972. Correlaciones entre los contenidos de nitrógeno y fósforo del suelo y la composición del tejido vegetal en café y pasto. CENICAFE, Colombia. Vol. 22(1):18-25.

Parfitt, R. 1985. The nature of andic and vitric materials. In: Proceedings of the Sixth International Soil Classification Workshop. Part 1: Papers. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Santiago de Chile. pp: 21-39.

Parfitt, R. y J. M. Kimble. 1989. Conditions for formation of allophane in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 971-977. 3

Pastrana, A.L. 1979. Efecto residual de rocas fosfóricas en suelos ácidos de Huimanguillo. Tab. Memorias del XII Congreso Nal. De Ciencias del Suelo. Morelia, Mich. México.

Pastrana, A.L. 1979. El uso de cal dolomítica en suelos ácidos de la sabana de Huimanguillo, Tab. Memorias del XII Congreso Nal. de Ciencias del Suelo. Morelia, Mich. México.

Pérez, R. y Mury, M. 1992. Plan de fertilización para rendimientos óptimos en el cultivo de café. Grupo Disagro. Public 1 Guatemala. 4p.

Ping, C. L. et al. 1989. Characteristics and classification of volcanic-ash-derived soils in Alaska. *Soil Sci.* 148(1): 8-28.

Ping, C. L.; S. Shoji y T. Ito. 1988. Properties and classification of three volcanic ash derived pedons from Aleutian Islands and Alaska peninsula, Alaska. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 455-462.

Pino N. I. 1982. Fósforo en suelos volcánicos. *Publ Misc Agric No.* 121-149.

Pritchett, W.L. (1986). Suelos Forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Edit. Limusa. México.

Quantin, P. 1986. Properties and genesis of Andisols. *Cah. ORSTOM, Ser. Pedol., Vol. XXII (1)* 105-111.

Quirós, S., y González, M.A. 1979. Neutralización del aluminio intercambiable y aprovechamiento del fósforo en tres suelos de Costa Rica. *Agron. Costarr.* 3(2):137-149.

Rajú, L. & Subramanian, T.R. 1969. Studies on leaf analysis in the NPK nutrition of arabica coffee. *Turrialba (Costa Rica)* 19(1)49:56

Ramírez, F, Bertsch, F y Mora L. 1999. Absorción de nutrimentos por los frutos de café durante un ciclo de desarrollo y maduración de frutos en AQUIARES, Turrialba y posible impacto de la fertilización foliar. XI Congreso Nacional agronómico/III Congreso Nacional de Suelos. Resumen 344, p. 112-114.

Ramírez, F., Bertsch, F y Mora L. 2002. Consumo de nutrimentos por los frutos y bandolas de café Caturra durante un ciclo de desarrollo y maduración en AQUIARES, Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26(1): 33-42.

Ramos H., S.G. 1979. Estudios edafológicos de una zona cafetalera de Soconusco, Edo. De Chiapas. Tesis Bióloga. Fac. de Ciencias. UNAM.

Ramos, H. S., Vallejo, E. y Aguilera, N 1982. Edafología del cafetal. In: Memorias 1er Simposio Estudios Ecológicos en el Agroecosistema Cafetalero, Xalapa, Veracruz. Edit. CECSA. 98 p.

Ramos H.S.G., 1982. Comportamiento de fertilizantes fosfatados y el uso de enmiendas calcáreas y silicatadas en suelos fijadores de fósforo. Tesis Maestría en Ciencias. Div. De Estudios de Posgrado, Fac. de Ciencias, UNAM. 140 p.

Ramos, H.,S.G. y Aguilera H.N. 1980. Estudios edafológicos de una zona cafetalera de Soconusco, Edo. De Chiapas. Tomo I. XIII Congreso Nal. De la Ciencia del Suelo. Toluca, Edo. De México. P.258-277.

Ramos H.G. y Aguilera, H.N. 1984. Comportamiento de fertilizantes fosfatados en suelos fijadores de fósforo. Anales de Edafología y Agrobiología. CSIC, España. Tomo XLIII(1-2):215-234.

Ramírez, F. y Bertsch, F. (1999). Absorción de nutrimentos por los frutos de café durante un ciclo de desarrollo y maduración de frutos en Aquiares, Turrialba, y posible impacto de la fertilización foliar. XI Congreso Nacional Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos. Resumen 344.

Ramírez, G. 1980. Análisis químico del suelo como guía para la fertilización del cafeto. Noticiero del Café. Costa Rica 6(187):1-4.

Rena, A.B., Malavolta, E., Rocha, M., y Yamada, T. 1986. Cultura do cafeeiro. Fatores que afetam a produtividade. Associação Brasileira para Pesquisa da potassa e do Fosfato. 447 p.

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. Ed Limusa. México. 432 p.

Rivera, R., y Sam, O. 1983. Estudio preliminar de la relación crecimiento vegetativo, crecimiento del fruto y el estado nutricional, en *Coffea arabica* L (variedad caturra), a plena exposición solar. Cultivos Tropicales, Vol. (3):399-405.

Rivero C., Padrino, M. y Giampietro, T. 2001. Efecto de la incorporación de estiércol de bovino y roca fosfórica sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo. Rev. Fac. Agron. (Maracay) 27:143 -153.

Salas, E., y Ramírez, C. 2001. Determinación del N y P en abonos orgánicos mediante la técnica del elemento faltante y un bionsayo microbiano. Agronomía Costarricense. Vol. 25(2):25-37.

Salas, A.M., Elliott, E.T., Westfall, D.G., Cole, C.V. and Six, J. 2003. The role of particulate organic matter in phosphorus cycling. Soil Sci Soc of Amer Journal 67:181-189.

Sánchez, P.A. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. IICA, San José, Costa Rica, 623p.

Sánchez, P.A. y Salinas, J.G. 1983. Manejo del fósforo. En: Suelos ácidos. Estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical. Ed. Soc. Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp 55-71.

Saunders, H.M. and Williams, E.G. 1955. Determination of total organic phosphorus in soils. *Journal of Soil Science* 6(1):254-260.

Sen Gupta, M.B. y Cornfield, A.H. 1962. Phosphorus in calcareous soils. I The inorganic phosphorus fractions and their relations to the amount of calcium carbonate present. *Journal of the Science of Food and Agric.* 13(4):652-655.

Shoji, S., J.M. Nansyo y R. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization. *Developments in Soils Science* 21:288.

Snoeck, J. 1984. Caféier. In. *Analyse végétale dans le controle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Technique et documentation (Levoisier).* 473-485.

Soil Survey Staff. 1988. *Soil Taxonomy.* Soil Conservation Service. Washington, D.C. 754pp. (USDA Agricultural Handbook 436).

Soil Survey Staff. 1992. *Keys to soil taxonomy.* Virginia. 541 pp.(SMSS Technical Monograph No. 19).

Solórzano, P.R., Gimenez, R., y Silva, O. 2001. Movimiento vertical de diferentes fuentes de fósforo en dos suelos con texturas contrastantes. *Venesuelos* 2(2):86-88.

Sommer-Cervantes, I., Flores-Delgadillo, L. y Gutiérrez-Ruiz, M. 2003. Caracterización de los suelos de la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas. In: *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México.* UNAM, Inst de Biología, Facultad de Ciencias e Instituto de Ecología, A.C.

Soto, T. y Torrent, J (1999). Desorción de fósforo en Andisoles de la Región Central Oriental de Costa Rica. XI Congreso Nacional Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos. Resumen 340.

Soto, G y Muñoz, C. 2002. Consideraciones teóricas y prácticas sobre el compost y su empleo en la agricultura orgánica. *Manejo integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica).* Sec. Agric Org. No. 65 p. 123-129.

Sosa M., A., y Mendoza B., M.A. 1996. Posibilidades financieras de diversificación de cafetales mexicanos. *Rev. Madera y Bosques* 2(1). 32-43.

Reeve, N.G. y Sumner, M.E. 1970. Effects of aluminum toxicity and phosphorus fixation on Crop growth on Oxisol in Natal. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:263-267.

Regalado Ortiz, A. 1996. *Manual para la cafeticultura mexicana.* Publ Inca Rural. Consejo Mexicano del Café. 154 p.

Reyes de Alvarez, I. 1991. Dinámica del fósforo y aislamiento de algunos microorganismos en la mezcla pulpa de café-roca fosfórica. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 17:397-408.

Ríos, H.W. y Pearson, M. 1964. The effect of some chemical environmental factors on cotton root behavior. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28:232-235.

Rodas Cifuentes, A., Nuñez Escobar, R., Espinoza Hernández, V., y Alcántara González, G. 2001. Asociación Lupino-Maiz en la nutrición fosfatada en un Andosol. *Rev. Terra.* Vol. 19(2): 141-154.

Rojas Walker, C y Besoain Monasterio, E. 1991. Estudio agronómico de rocas fosfóricas chilenas. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 17:111-123.

Roy, A.C., Ali, M.Y., Fox, R.L. and Silva, J.R. 1971. Influence of calcium silicate on phosphates solubility and availability in Hawaiian latosols. *Int. Symp. On Soil Fertility Ev. Proc. N. Delih* 1:757-765.

Sauer, T.J. and Mekk, D.W. 2003. Spatial variation of plant-available phosphorus in pastures with contrasting management. *Soil Science Society of America Journal* 67:826-836.

Saunders, H.M. y Williams, E.G. 1955. Determination of total organic phosphorus in soils. *Journal of Soil Sci.* 6(1):254-260.

Saber, T.J., AND Meek, D.W. 2003. Spatial variation of plant available phosphorus in pastures with contrasting management. *Soil Science Society of America Journal* 67:826-836.

Salas , E., y Ramírez C. 2001. Determinación del N y P en abonos orgánicos mediante la técnica del elemento faltante y un bioensayo microbiano. *Agronomía costarricense.* Vol. 25(2):25-37.

Salas, A.M., Elliot, E.T., Westfall, D.G., Cole, C.V. and Six, J. 2003. The role of particulate organic matter in phosphorus cycling. *Soil Sci Soc of Amer Journal* 67:181-189.

Sáenz Colín, A. (1990). *El cultivo del café en México.* Instituto Mexicano del Café... Edición. Edit Lafuente, S.A. 230 p.

Saleque, M.A., Naher, U.A., Islam, A., Pathan, A.B.M.B.U., Hossain, T.M.S. and Meisner, C.A. 2004. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils. *Soil Sci Soc Am J.* 68:1635-1644.

Sánchez, P.A. 1981. *Suelos del trópico: características y manejo.* Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica, 623 p.

Sánchez, P.A., Cheryl A., Palm and Smith J.T. 1990. Phosphorus dynamics in shifting cultivation systems in the Amazon. In *Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic*

ecosistemas. Scope-Unep Regional Workshop 3: South and Central America. Saakatoon. Pp 142-160.

Sánchez S. L. F., y Owen B.E.J. 1978. Estudio comparativo de fuentes de fósforo en un Oxisol de Pie de Monte. Turrialba 13(4):641-648.

Sánchez, P.A. y Salinas, J.G. 1983. VI. Manejo del fósforo. In: Suelos ácidos. Estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical. Soc. Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp 55-71.

Sharpley, A. 1996. Availability of residual phosphorous in manured soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:1459-1466.

Secretaría de Estado de Agricultura. 1987. Manual de la caficultura Dominicana. Secretaría del Estado de Agric. Depto. de Café. Pub. Esp. 110 p.

Serpa, R. y González, M.A. 1979. Necesidad de cal en tres suelos ácidos de Costa Rica. Agron. Costarr. 3(2):101-108.

Shoji, S. et al. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World Reference Base for Soil Resources. Soil Science 161(9): 604-615.

Shoji, S.; R. Dahlgren y M. Nanzyo. 1993. Genesis of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier. Amsterdam. pp: 37-

Siebe, C., H.R., Jahn y K. Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Chapingo, México, 57 pp. (Pub Esp 4).

Smith, T.J. Y Sánchez, P.A. 1982. Phosphate rock and superphosphate combinations for soybeans in a Cerrado Oxisol. Agronomy Journal. Vol74:730-735.

Smith, T.J. Y Sánchez, P.A. 1982. Phosphate rock dissolution and availability in Cerrado Soils as affected by phosphorus sorption capacity. Soil Sci. Soc. of Amer. Journal. Vol. 46(2):339-345.

Sommer-Cervantes, I., Flores-Delgadillo, L y Gutiérrez-Ruiz. 2003. Caracterización de los suelos de la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas. In Ecología del Suelo en la Selva Tropical Húmeda de México. UNAM-Fac de Ciencias-Instituto de Ecología, A.C. págs 17-51.

Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy. A basic system of Soil Classification for making and interpreting Soil Survey. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. USDA. 2a Edic. Washintgton, 754pp. (USDA Agricultural Handbook 436).

Soil Survey Staff, 1992. Keys to soil taxonomy. Virginia, 541 pp. (SMSS Technical Monograph No. 19).

Solórzano-P, P., Jiménez, R., y Silva, O. 1998. Movimiento vertical de diferentes fuentes de fósforo en dos suelos de texturas contrastantes. *Rev. Venesuelos* 2(2):86-88.

Solórzano P., P.R. 1991. Evaluación de roca fosfórica natural y compactada en diversos sistemas suelo-planta en Venezuela. *Rev. Venesuelos* 1(1): 31-36

Soto, G. y Muñoz, C. 2002. consideraciones Teóricas y prácticas sobre el compost y su empleo en la agricultura orgánica. Manejo integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica). *Sec. Agric Org. No. 65*:123-129.

Suárez, D., e Igue, K. 1974. Efecto del tamaño de granos en la absorción de fósforo len suelos volcánicos. *Turrialba* 24(2):180-186.

Suehisa, R.H., Youngue, D.R. y Sherman, G.D. 1963. Effects of silicates on phosphorus availability to Sudan grass on Hawaiian Soils. *Agric. Exp. St. Of Hawaii. Tech Bull.* 51.

Swindale, L. 1969. Propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Centro de Enseñanza e Investigación. Turrialba, Costa Rica. B.9.1-11

Swindale, L. 1964. The properties of soil derived from volcanic ash. Report the Meeting on the classificaciton and correlation of soil from volcanic ash. *World Soil Resources Rep.* 14, FAO, Rome.

Syers, J.K., Williams, J.D.H., Walker, T.L.H. and Chapman, a. 1970. Mineralogy and forms of inorganic phosphorus in a gray wacke soil-rock weathering secuencia. *Soil Sci.* 11(2):110-116.

Tandon, H.L.S. 1970. Fluoride-extractable aluminum in soils: 2. As a index of phosphate retention by soils. *Soil Sci.* 109(1):13-18.

Technical Circular No. 59. 1986. Standard recomendations for fertilizers. Kenya coffee 59169-175.

Torbert, H.A., King, K.W. and Harmel, R.D. 2005. Impact of soil amendmets on reducing phosphorus losses from runoff in sod. *J. Environ Qual Amer Soc of Agronomy, Crop Science Soc of Amer and Soil Sci Soc of America* 34:1415-1421.

Turrent, F.A. 1963. Estudios de las formas de eliminar el retraso del crecimiento de lechugas cuando se trasplantan en el invernadero sobre suelos de la Sierra Tarasca, Mich. Colegio de Postgraduados E.N.A. Tesis Maestro en Ciencias Agrícolas.

Turrent, F.A. 1960. Determinación de los coeficientes de absorción de fósforo de diferentes fuentes por plántulas de sorgo. Tesis Ing. Agrón. Esp. De Fitotecnia, E.N.A. Chapingo, México.

Toor, G.S., Condrón, L.M., Di, H.J., Cameron, K.C. 2004. Seasonal Fluctuations in phosphorus loss by leaching from a grassland soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1429-1436.

USDA, 1975. *Soil Taxonomy. A modern system of clasification of soils.*

Uribe-Henao, A. 1983. Phosphorous effect on coffee yield. *Cenicafé (Colombia)* 34(1):3-15

Uribe-Henao, A. 1983. Efecto del fósforo en la producción de café. *CENICAFE (Colombia)*. 8(34):4-12.

Uribe, A. y Laverde, B. D. 1972. Distribución anual de la cosecha de café. *Avances técnicos CENICAFE No. 16.* 4 p.

Uribe-Henao, A. y Mestre-Mestre, A. 1976. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *CENICAFE*: 158-173.

Uribe-Henao, A. y Salazar, A.N. 1983. Influencia de la pulpa del café en la producción de cafeto. *CENICAFE (Colombia)*. Vol. 34(2):44-58.

Urrutia, J., e Igue, K. 1972. Reacciones de los fosfatos monocálcico monohidratado y dicálcico anhidro en suelos volcánicos. *Turrialba* 22(3):144-149.

UNEP. 2000. *Mineral Fertilizer Use and the environment.* Intern Fertilizer Industry Assoc. Paris. 53 pp.

Vadas, P.A., and Sims, J. T. 2000. Predicting phosphorus desorption from Mid-Atlantic Coastal plain soils. *Soil Science Society of America Journal* 66:623-631.

Valencia-Aristizabal, G. 1968. Deficiencias minerales en relación con el metabolismo intermedio en el cafeto. *CENICAFE, Colombia XIX*:55-79.

Valencia-Aristizabal, G. 1984. Interpretación de análisis de suelos para café. *Suelos Ecuatoriales*, Vol. XIV(1):186-189.

Valencia, G. 1998. *Manual de Nutrición y Fertilización del Café.* Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS). Quito, Ecuador.

Valencia, G. 1999. *Fisiología, Nutrición y Fertilización del Cafeto.* Agroinsumos del Café S.A. Manizales, Colombia.

Valencia A., G. Deficiencias minerales en el cafeto y manera de corregirlas. *Boletín Técnico No. 1.* Federacafé. CENICAFE. 16 p.

Valencia-Aristizabal, G. y Arcila Pulgarín, J. 1977. Efecto de la fertilización con N,P,K, a tres niveles en la composición mineral de las hojas del cafeto. *CENICAFE*, Vol. 28(4):119-138.

Valencia, A., G. y Franco A., H.F. 1985. Calibración entre métodos de extracción de micronutrientes para análisis de suelos y las necesidades del Cafeto. CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

Van Wambeke, A. 1992. Soil of the tropics: properties and appraisal. McGraw-Hill, New York, 343 p.

Vanderdeelen, J., Pino I.N., y Baert, I. 1973. Kinetics of phosphate adsorption in a soil derived from volcanic ash. *Turrialba* 23(3):292-296.

Vázquez, S., Morales, L.A., Dalurzo, H:C. 2004. Disponibilidad del fósforo en suelos ácidos de Misiones, Argentina. *Agricultura Técnica (Chile)*. 64(1):50-57.

Velasco, E.E. 1975. El equilibrio fisiológico como índice de diagnóstico de deficiencias nutritivas. *Anales de Edafología y Agrobiología*. Tomo XXXIV(7-8):623-631.

Villachica, L.H., Quevedo I.F. 1972. Efecto del encalado en el rendimiento y concentración de nutrientes en el sorgo. *Turrialba* 22(1):11-17.

Villar, S.A. y Pastrana, A.L. 1979. Efecto del encalado sobre algunas propiedades químicas y de aprovechamiento del fósforo en suelos ácidos de la Sabana de Huimanguillo,. Tab. *Memorias del XII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo Morelia, Mich. México*.

Vinasco-Ossa, C.A. y Valencia-Aristizábal, G. 1984. El cafeto y sus necesidades de fósforo I. Selección de métodos analíticos de fósforo en suelos. *Suelos Ecuatoriales*, Vol. XIV(1):177-185.

Wada, K. 1959. Reaction of phosphate with allophane and halloysite. *Soil Sci.* 87(6):325-330.

Wada, K. and Gunkigake, N. 1979. Active aluminum and iron and phosphate adsorption in ando soils. *Soil Sci.* 128(6):331-336.

Williams, C.H. and Simpson, R.R. 1965. Some effects of cultivation and waterlogging on the availability of phosphorus in pasture soils. *Australian Journal Agric. Res.* 16:757-763.

Williams, J.L.D.H., Syers, J.K., Walker, T.W. and Rex, R.W. 1970. A comparison of methods for the determination of soil organic phosphorus. *Soil Sci.* 110(1):13-17.

Woodruff, J.R., y Kamprath, E.J. 1965. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:148-150.

WRI, 2003. Ecosistemas y bienestar humano; marco para la evaluación. PNUMA-FAO. *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio*. 31 pp.

- Yañez C., P. 1992. Efectos del uso y manejo de la roca fosfórica de Monte Fresco en viveros de café. Jornadas Técnicas Estac Exp Táchira. Foniap Venezuela. Ene-Mar. 1 p.
- Yamada, S. 1980. Distribution and morphology of Soils Derived from Volcanic ash in Japan. CIMMYT, Edit. Las Américas. Méx.
- Yarza, de De la Torre, E. 1992. Volcanes de México. Inst. de Geografía. UNAM. 173 pp.
- Younge, D.R., y Plucknett, D.L. 1966. Quenching the high phosphorus fixation of Hawaiian Latosols. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30:653-655.
- Yost, R., Naderman, G.C., Kamprath, E.J. and Lobato E. 1982. Availability of rock phosphate as measured by and acid tolerant pasture grass and extractable phosphorus. Vol. 74:462.468.
- Zehetner, F., Miller, W.P. and West, L.T. 2003. Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. Soil Sci Soc Am. J. 67:1797-1809.
- Zhang, H., Schroder, J.L., Furman, J.K., Basta, N.T., Storn, D.E., and Payton, M.E. 2000. Path and multiple regression analyses of phosphorus sorption capacity. Soil Sci Soc Am J. 69:96-106. Fassbender, H.W.
- Zhang, T.Q., MacKenzie, A.F., Liang, B.C. and Drury, C.F. 2004. Soil test phosphorus and fractions with long-term phosphorus addition and depletion. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:519-528
- Zheng, Z., Simard, R.R., Lafond, J. and Parent, L.E. 2002. Pathways of soil phosphorus transformations after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. Soil Science Society of America Journal 66:999-1007.
- CONAMP. Reserva de la Biosfera Volcán Tacaná. www.conamp.gob.mx
- CENAPRED. www.unam.cenapred.gob.mx