

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DE LA NECESIDAD DE HIERRO DEL CULTIVO DE PIÑA
Ananas comosus (L) Merr, var MD-2 EN TRES ÓRDENES DE SUELO DEL NORTE Y
CARIBE NORTE DE COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en
Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Maestría Académica
en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con Énfasis en Suelos

JHONNY VÁSQUEZ JIMÉNEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2010

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre Nicolás Vásquez Ovares...
A mi madre Lidia Jiménez Sandí...

AGRADECIMIENTO

A mi Señor Jesucristo, por la dirección, convicción y apoyo en los retos que emprendo, así como todas las enseñanzas y formación de carácter con las que me enriquece en el transcurso de ellas.

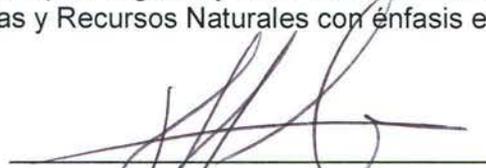
Por eso le temen los hombres; El no estima a ninguno que se cree sabio de corazón (Job 37:24).
Si eres sabio, eres sabio para provecho tuyo, y si escarneces, tú solo lo sufrirás (Prov. 9:12).

Al Ing. Gabriel Montoya Aristizabal, Gerente General de Banacol de Costa Rica, por su apoyo empresarial en el financiamiento de este estudio.

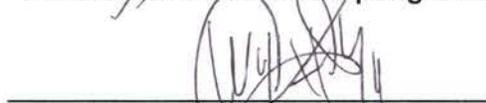
Al señor Roger Hidalgo Mora, Gerente de Producción Piña de Banacol de Costa Rica, por su apoyo en tiempo y espacio para realizar esta investigación.

Al Dr. Wagner Peña Cordero, por su trabajo en la dirección de esta tesis.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos.”



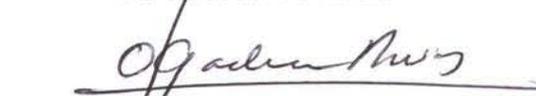
Dr. Rafael Salas Camacho
**Representante de la Decana
Sistema de Estudios de posgrado**



Dr. Wagner Peña Cordero
Director de Tesis



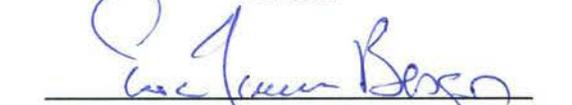
Dr. Carlos Henríquez Henríquez
Co-director de Tesis



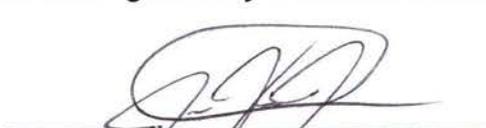
M. Sc. Arnoldo Gadea Rivas
Asesor



M. Sc. Álvaro Segura Monge
Asesor



Dr. Eric Guevara Berger
**Director Programa de Posgrado en
Ciencias Agrícolas y Recursos naturales**



Jhonny Vásquez Jiménez
Candidato

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
HOJA DE APROBACIÓN	iii
TABLA DE CONTENIDO	v
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	5
2.1 Objetivo general.....	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
3.1 Aspectos generales del cultivo de piña	6
3.2 Anatomía y fisiología de la piña y su relación con el suministro de nutrientes.....	7
3.2.1 La raíz de la planta de piña.....	7
3.2.2 Las hojas de la planta de piña.....	10
3.2.3 El sistema axilar de la planta de piña	12
3.3 Requerimientos climatoedáficos del cultivo de piña	13
3.3.1 Temperatura.....	13
3.3.2 Radiación solar y fotoperíodo	16
3.3.3 Precipitación.....	17
3.3.4 Suelo.....	18
Topografía.....	18
Textura	19
Fertilidad	20
3.4 Dinámica del hierro en las plantas	22
3.5 Consideraciones generales sobre el suministro de hierro en el cultivo de piña.....	24
3.6 Necesidades de hierro en el cultivo de piña	25
3.7 Fertilización con hierro en el cultivo de piña en el mundo	26
3.8 Fertilización con hierro en el cultivo de piña en Costa Rica.....	28
3.9 Disponibilidad de nutrientes en el suelo	29
3.10 Metodologías para determinar biodisponibilidad de hierro en Costa Rica.....	31
3.11 Formas de hierro en el suelo	32
3.11.1 Hierro total.....	35
3.11.2 Hierro soluble	36
3.11.3 Hierro de cambio.....	37
3.11.4 Hierro asociado a la materia orgánica	37

3.11.5 Hierro asociado a óxidos amorfos.....	38
3.11.6 Hierro asociado a óxidos cristalinos	39
3.11.7 Hierro residual	41
3.11.8 Hierro biodisponible.....	41
3.12 Indicadores microbiológicos de fertilidad y calidad del suelo	42
3.12.1 Materia orgánica	43
3.12.2 Conteo de poblaciones	44
3.12.3 Respiración microbiana	45
3.12.4 Actividad catalasa	47
3.12.5 Índice de mineralización	48
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	51
4.1 Localización	51
4.1.1 Finca Industria Cartonera Inca	51
Climatología.....	52
Geología.....	53
Geomorfología.....	55
Zona de Vida	55
4.1.2 Finca Agrícola Industrial San Cayetano.....	56
Climatología.....	56
Geología.....	58
Geomorfología.....	59
Zona de Vida	60
4.1.3 Finca Frutas Tropicales Venecia.....	60
Climatología.....	61
Geología.....	62
Geomorfología.....	63
Zona de Vida	64
4.2 Descripción de los tratamientos.....	64
4.3 Descripción de las parcelas experimentales.....	64
4.4 Aplicación de los tratamientos	65
4.5 Toma de muestras y determinaciones.....	66
4.5.1 Fraccionamiento del hierro.....	67
Hierro total	67
Hierro soluble	68
Hierro de cambio.....	68
Hierro ligado a la materia orgánica	69
Hierro asociado a óxidos amorfos inorgánicos	69
Hierro asociado a óxidos cristalinos	69
Hierro residual.....	70
Hierro biodisponible.....	70
4.5.2 Variables bioquímicas y microbiológicas evaluadas	71
Materia orgánica	71
Conteo de poblaciones	71
Respiración microbiana C-CO ₂	72
Actividad catalasa.....	74
Índice de mineralización	75
4.5.3 Variables de respuesta fisiológica y nutricional del cultivo	76
Tasa de crecimiento acumulada ajustada	77
Número de hojas por planta.....	77
Peso de la raíz	78
Porcentaje de raíz sana.....	78
Largo y ancho de la hoja D	79

Muestra foliar para análisis químico	79
4.6 Diseño experimental y análisis de datos	80
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82
5.1 Distribución de hierro en las fincas.....	83
5.1.1 Industria Cartonera Inca.....	83
5.1.2 Agrícola Industrial San Cayetano	84
5.1.3 Frutas Tropicales Venecia	84
5.2 Características fisicoquímicas generales de los órdenes de suelos	85
5.3 Determinaciones y nexos de las formas de hierro con el orden de suelo	87
5.3.1 Hierro total.....	87
5.3.2 Hierro asociado a óxidos cristalinos	90
5.3.3 Hierro asociado a óxidos amorfos inorgánicos	92
5.3.4 Hierro asociado a la materia orgánica.....	93
5.3.5 Hierro de cambio	96
5.3.6 Hierro soluble	97
5.3.7 Hierro biodisponible	98
5.3.8 Hierro residual.....	100
5.4 Relación entre biodisponibilidad de hierro con actividad microbiana y variables bioquímicas	102
5.5 Relación entre contenido de hierro en hoja D y actividad microbiana	105
5.6 Relación entre contenido de hierro en hoja D y fracciones del elemento en el suelo	106
5.7 Efecto de aspersiones con sulfato de hierro sobre el contenido de Fe en hoja D	109
5.8 Respuesta de las variables de crecimiento a la aplicación de los tratamientos.....	125
7 CONCLUSIONES	132
8 RECOMENDACIONES	135
9 LITERATURA CITADA	137
10 ANEXO	145

RESUMEN

Se realizó una investigación en tres órdenes de suelo cultivados con piña *Ananas comosus* (L) Merr, Híbrido MD-2, en los cantones de San Carlos y Sarapiquí, Costa Rica (ultisol, inceptisol, entisol), en la que se evaluó el suministro de hierro al cultivo, mediante el análisis del fraccionamiento del hierro en el suelo, su relación con la microbiología y la concentración del nutrimento en la planta, para determinar la necesidad real de aspersiones foliares de este elemento sobre el cultivo. Se evaluaron tres dosis de fertilización con hierro (0 Kg Ha^{-1} , 6.67 Kg Ha^{-1} y 13.34 Kg Ha^{-1} de Fe) usando como fuente sulfato heptahidratado (20% de Fe). Se evaluaron diferentes variables de crecimiento de la planta de piña, tasa de crecimiento acumulada ajustada, largo de hoja D, ancho de hoja D, peso fresco de raíz, peso seco de raíz y porcentaje de raíz sana. Adicionalmente se evaluó la concentración del nutrimento en tres segmentos de la hoja D (apical, medio y basal). Las mediciones se realizaron una semana antes de la inducción de la floración (forzamiento). En todos los casos se utilizó un paquete tecnológico de fertilización y manejo agronómico convencional. A nivel de suelo, se evaluó el fraccionamiento del hierro, mediante la determinación del hierro soluble, hierro de cambio, hierro asociado a la materia orgánica, hierro asociado a óxidos cristalinos, hierro asociado a óxidos amorfos inorgánicos, hierro residual y hierro total, adicionalmente se determinó el hierro biodisponible. Las variables bioquímicas y microbiológicas evaluadas fueron, materia orgánica, respiración microbiana, índice de mineralización, actividad enzimática de catalasa y conteo de poblaciones microbianas. Para el análisis de los datos se utilizó el SAS 6.11 para realizar una regresión escalonada y elegir las variables que mostraron una relación estadística con probabilidad < 0.05 las cuales se analizaron en Statistica 6.0, mediante un GLM y un modelo bifactorial en las que se esperaba efecto del tratamiento. Los resultados no mostraron influencia de la actividad microbiana sobre las variables de crecimiento del cultivo evaluadas. No obstante, la baja actividad microbiana en los suelos estudiados se considera como un indicador de la salud del suelo cuando se trata de piña en el trópico. Se encontró que las fracciones de hierro soluble y de cambio consideradas fácilmente asimilables y asimilables respectivamente, son las responsables de la mayor respuesta en la planta en lo que absorción de hierro se refiere. Adicionalmente, se encontró que la fracción de hierro asociada a la materia orgánica es una fracción importante del hierro biodisponible por lo que se considera como potencialmente asimilable. Se encontró una relación antagónica de los elementos Fe y Mn tanto en suelo como a nivel foliar lo que confirma lo encontrado por otros investigadores, sobre la mayor importancia de la relación foliar entre el Fe y Mn, que las cantidades totales de estos elementos por separado. Se determinó la importancia del sistema radicular de piña sobre la absorción del hierro y la influencia de propiedades físicas, químicas del suelo y el agua disponible sobre la sanidad del sistema radical. Se determinó que el empleo de aplicaciones preventivas de fertilizantes con hierro en zonas con características similares a las investigadas no es necesaria, lo cual puede implicar una reducción de costos, un mejor manejo de la fertilización y un menor impacto ambiental al disminuirse el uso de un insumo no necesario. Se determinó que esta práctica podría ser válida únicamente después de un diagnóstico foliar y la confirmación sintomática a nivel de campo, para lo cual se puede considerar una relación Fe/Mn foliar entre 0,15 – 0,2 como de riesgo de deficiencia.

ABSTRACT

An research was conducted in three soil orders cultivated with pineapple *Ananas comosus* (L) Merr, Hybrid MD-2, in the counties of San Carlos and Sarapiquí, Costa Rica (ultisols, inceptisols, entisols). It was evaluated the supply iron to the culture, through analysis of the fractionation of iron in the soil, its relationship to the microbiology and concentration in the plant, to determine the real need for foliar sprays of this element on the crop. It was evaluated three doses of iron fertilization (0 kg ha^{-1} , 6.67 Kg Ha^{-1} and 13.34 kg ha^{-1} of Fe as the sulfate heptahydrate and 20% of this element). Several variables of growth of pineapple plant, adjusted cumulative growth rate, leaf length D, width of leaf D, root fresh weight, root dry weight and percentage of healthy root. Was also compared nutrient concentration in three segments of the leaf D (apical, middle and basal). Measurements were made one week before the induction of flowering (forcing). In all the cases it was used a technology package fertilization and conventional crop management. At soil level, it was evaluated the fractionation of iron, by determining the soluble iron, change iron, iron associated with organic matter, iron associated with crystalline oxides, iron associated with oxides amorphous inorganic, residual iron and total iron, in addition bioavailable iron was determined. The biochemical and microbiological variables were evaluated, organic matter, microbial respiration, mineralization rate, enzyme activity of catalase and counting of microbial populations. For data analysis the SAS 6.11 was used to perform a stepwise regression and choose the variables that showed a probability <0.05 of which were analyzed in Statistica 6.0, using a GLM and a two-factor model in which treatment effect was expected. The results showed no influence of microbial activity on crop growth variables evaluated, however, low microbial activity in soils studied is considered as an indicator of soil health when it comes to pineapple in the tropics. It was found that the fraction of soluble iron and change iron considered easily assimilated and assimilated, respectively, are responsible for the higher response in the plant as iron absorption is concerned. Additionally, it was found that the fraction of iron associated with organic matter is a significant fraction of bioavailable iron which is considered as potentially assimilated. It was found an antagonistic relationship of the elements Fe and Mn in both soil and leaf at which confirms the findings by other researchers, the highest importance of the relationship between leaf Fe and Mn, that the total amounts of these elements separately. It was determined the importance of pineapple root system on the iron absorption and the influence of physical, chemical soil and water available on the health of the root system. It was determined that the use of preventive applications of fertilizer with iron in areas with characteristics similar to those investigated is not necessary, which can lead to a reduction of costs, better management of fertilizer and reduced environmental impact by reducing the use of a input is not necessary, it was determined that this practice could be valid only under the diagnosis and confirmation symptomatic leaf at the field level, for which a relationship can be considered Fe / Mn foliar between 0.15 to 0.2 as at risk of deficiency.

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Suministro de nutrimentos al cultivo de piña de acuerdo con algunos investigadores.....	28
Cuadro 2. Programa de fertilización común para el cultivo de la piña en Costa Rica.....	28
Cuadro 3. Cantidad ($\text{Ha}\cdot\text{kg}^{-1}$) de elementos nutritivos aportados por el programa de fertilización sobre las unidades experimentales.....	66
Cuadro 4. Contenidos exploratorios de hierro en el suelo (DTPA). Promedios de 12 muestras por finca ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).....	85
Cuadro 5. Características fisicoquímicas generales de los suelos estudiados.....	87
Cuadro 6. Fracciones de hierro en tres órdenes de suelo (valores promedio de 12 unidades experimentales por orden de suelo).....	87
Cuadro 7. Comportamiento de variables bioquímicas y microbiológicas en los órdenes de suelo estudiados (valores promedio de 12 unidades experimentales por orden de suelo). Junio 2008.....	104
Cuadro 8. Contenido de manganeso (Olsen modificado) en los suelos estudiados ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).	104
Cuadro 9. Contenido de materia orgánica y actividad microbiana en los suelos estudiados.....	105
Cuadro 10. Relaciones entre Fe y Mn en la hoja D, Marchal (1971) citado por Py <i>et al.</i> (1987), en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ms}$	106
Cuadro 11. Características de crecimiento foliar por orden de suelo y por tratamiento (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de la planta de piña. Fuente: Py <i>et al.</i> (1987).....	12
Figura 2. Esquema de distribución de los metales en sus diferentes formas en el suelo (Adaptado de Ross (1994), citado por Peña (2004)).....	33
Figura 3. Esquema de procesos que regulan las transformaciones del oligoelemento Fe en los suelos (Adaptado de Fassbender y Bornemisza 1987).....	36
Figura 4. Fotografía Finca Industria Cartonera Inca. Fuente: CENAT-PRIAS. Misión Carta 2005. Imagen Fotográfica Falso Color Natural.	52
Figura 5. Temperatura y precipitación de Finca Industria Cartonera Inca, durante el período de la investigación.	52
Figura 6. Horas Luz/día y radiación solar ($W/m^2/día$) de Finca Industria Cartonera Inca, durante el período de la investigación.	53
Figura 7. Fotografía Finca Agrícola Industrial San Cayetano. Fuente: CENAT-PRIAS. Misión Carta 2005. Imagen Fotográfica Falso Color Natural.	56
Figura 8. Temperatura y precipitación de Finca Agrícola Industrial San Cayetano, durante el período de la investigación.	57
Figura 9. Horas Luz/día y radiación solar ($W/m^2/día$) de Finca Agrícola Industrial San Cayetano, durante el período de la investigación.	58
Figura 10. Fotografía Finca Frutas Tropicales Venecia. Fuente: CENAT-PRIAS. Misión Carta 2005. Imagen Fotográfica Falso Color Natural.	61
Figura 11. Temperatura y precipitación de Finca Frutas Tropicales Venecia, durante el período de la investigación.	61
Figura 12. Horas Luz/día y radiación solar ($W/m^2/día$) de Finca Frutas Tropicales Venecia, durante el período de la investigación.	62
Figura 13. Desarrollo de colonias de microorganismos en caja petri. Junio 2008.....	72
Figura 14. Técnica de incubación del suelo para determinación de la respiración microbiana.	73
Figura 15. Preparación de las muestras para la determinación de la actividad catalasa.	75
Figura 16. Técnica de cuantificación del peso de planta en campo.	76
Figura 17. Técnica para la determinación del número de hojas en campo.....	77
Figura 18. Determinación del peso de la raíz.	78
Figura 19. Determinación del ancho de la hoja D.	79
Figura 20. Preparación de la muestra foliar en campo.....	79

Figura 21. <i>Grados día</i> acumulados por mes en cada una de las fincas. Cálculo realizado considerando una <i>temperatura base</i> de 14°C y <i>temperatura promedio diaria</i> de la estación meteorológica ubicada en cada finca.	82
Figura 22. Distribución de hierro en Finca INCA. El círculo azul señala el lote del ensayo, rango 50-100 ppm de Fe, Mehlich 3. Interpolación Kriging de Surfer V7.0.....	83
Figura 23. Distribución de hierro en Finca AISC. El círculo azul señala el lote del ensayo, rango 500-550 ppm de Fe, Mehlich 3. Interpolación Kriging de Surfer V7.0.....	84
Figura 24. Distribución de hierro en Finca FTV. El círculo azul señala el lote del ensayo, rango 90-140 ppm de Fe, Mehlich 3. Interpolación Kriging de Surfer V7.0.....	84
Figura 25. Hierro total en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	88
Figura 26. Contenidos de arcilla en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	89
Figura 27. Hierro asociado a óxidos cristalinos en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	90
Figura 28. Hierro asociado a óxidos amorfos inorgánicos en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	92
Figura 29. Hierro asociado a la materia orgánica en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	93
Figura 30. Contenido de materia orgánica en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	94
Figura 31. Hierro de cambio en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	96
Figura 32. Hierro soluble en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	97
Figura 33. Hierro biodisponible en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	99
Figura 34. Hierro residual en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	101
Figura 35. Relación entre el hierro biodisponible y el índice de mineralización. Statistica, 2D Scatterplot ($p<0.05$).	103
Figura 36. Relación entre hierro biodisponible e índice de mineralización por orden de suelo.	103
Figura 37. Relación entre el Fe/Mn en el tercio basal de la hoja D y el Fe soluble en el suelo Statistica, 2D Scatterplot ($p<0.05$).	107
Figura 38. Relación foliar Fe/Mn en tercio basal de la hoja D en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	107

Figura 39. Relación foliar Mn/Fe en tercio basal de la hoja D en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).....	108
Figura 40. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio apical de la hoja D en los diferentes tratamientos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.....	110
Figura 41. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio apical de la hoja D en los diferentes órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.....	110
Figura 42. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio medio de la hoja D en los diferentes tratamientos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.....	111
Figura 43. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio medio de la hoja D en los diferentes órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.....	111
Figura 44. Interacción orden x tratamiento en el contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en tercio medio de la hoja D (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	112
Figura 45. Interacción orden x tratamiento sobre contenido foliar de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio medio de la hoja D, las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.	113
Figura 46. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio basal de la hoja D en los diferentes tratamientos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.....	114
Figura 47. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio basal de la hoja D en los diferentes órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.....	115
Figura 48. Interacción orden x tratamiento en el contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en tercio basal de la hoja D (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	116
Figura 48. Peso seco (grs) y contenido de humedad (%) de la raíz de plantas de piña en los diferentes suelos (letras iguales indican diferencias no significativas en la variable peso seco de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	118
Figura 50. Porcentaje de raíz sana en plantas de piña en los diferentes suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	119
Figura 51. Precipitación acumulada durante la investigación en las tres condiciones de suelo.	120
Figura 52. Contenido de bacterias anaeróbicas ($\text{Log ufc}\cdot\text{gr suelo}^{-1}$) en los tres órdenes de suelo estudiados (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	121
Figura 53. Coloración foliar característica de las unidades experimentales donde se estableció la investigación.	123

Figura 54. Tasa de crecimiento acumulada ajustada de cultivo de piña en tres órdenes de suelo (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).....	125
Figura 55. Tasa de crecimiento acumulada ajustada de cultivo de piña en tres niveles de suministro de hierro foliar (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).....	126
Figura 56. Interacción orden x tratamiento en la variable tasa de crecimiento (grs·día-1) acumulada ajustada (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).....	127
Figura 57. Interacción orden x tratamiento en la variable número de hojas por planta de piña (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).....	128
Figura 58. Interacción orden x tratamiento en la variable ancho de hoja D (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).	130

1. INTRODUCCIÓN

El mercado de la piña como fruta fresca ha tenido un gran auge desde 1980 y esa tendencia continúa; por lo que es necesario dedicar grandes esfuerzos a la investigación (Jiménez 1999).

Según datos de Vásquez (2006), en la actualidad Costa Rica comercializa alrededor de 39% de fruta fresca, mientras que Filipinas apenas alcanza 14% y Costa de Marfil 12%. cifra que refleja la importancia del cultivo para Costa Rica en el ámbito mundial, ocupando el primer lugar como país exportador.

En informes de CNP (2008), se indica que la piña es el segundo producto agrícola de importancia y el cuarto en la exportación nacional, siendo superado por el banano, los microchips y el turismo como actividades de importancia económica.

Los Estados Unidos son uno de los principales mercados para la piña costarricense, con 85% del total de las importaciones de ese producto fresco, lo que deja de manifiesto la solidez de este sector en el mercado mundial. Buena parte del crecimiento de las exportaciones costarricenses se basa en que el país aprovechó apropiadamente el surgimiento de la variedad conocida como MD2 o piña dulce (Vásquez 2006).

En 2008 las exportaciones costarricenses de piña alcanzaron 1.444.458 toneladas métricas, un valor FOB de US\$566,8 millones. La actividad de piña como agro cadena generó ingresos de divisas por US\$644,4 millones en este mismo año, 20,1% más que en 2007. En términos de área, Costa Rica contaba con aproximadamente 13.000 hectáreas de plantación en 1998; no obstante, para el cierre del año 2008 se contabilizaron 43.500 hectáreas, con un crecimiento sostenido anual cercano a 13%, para el 2009 se tienen proyecciones de alcanzar 50.891 hectáreas de cultivo (CNP 2009), lo que representa 15% de crecimiento con respecto al año anterior.

Esta posición coloca este cultivo como una fuente de considerables ingresos y generación de empleo en el país, sin embargo la intensificación de este cultivo desde finales de la década de los 70`s, ha ido acompañado por la adopción de tecnologías totalmente nuevas en el país, se provoca una reducción de los precios de venta de la fruta, tanto a nivel nacional como internacional; lo que hace necesario que las empresas busquen oportunidades de reducción de costos para lograr competir y mantenerse en el mercado.

La agroindustria de la piña tiene un importante número de áreas operativas que pueden ser revisadas para identificar posibles oportunidades de reducción de costos, sin lugar a duda una de ellas es el paquete tecnológico de producción. En este sentido, revisando específicamente el programa de fertilización de la compañía Banacol de Costa Rica, se encontró que el hierro como nutrimento es necesario evaluarlo dadas las características generales de los suelos donde se ubican las mayores áreas de producción de piña.

Los suelos dedicados a la producción de piña en el país son de propiedades químicas ácidas, poco fértiles y altos en hierro total. De acuerdo con recopilación de datos de Bertsch (1995), las zonas y cantones más importantes del país dedicadas al cultivo, no presentan deficiencias de hierro.

Por otra parte, García y García (1982) consideran que las carencias nutritivas de microelementos que se producen en los cultivos no se deben muchas veces a pobreza del suelo, sino a la presencia de antagonismos, que impiden la asimilación por las raíces.

A pesar de esto, en el cultivo de piña se realizan aplicaciones rutinarias de hierro mediante aspersiones, principalmente en forma de sulfato.

De acuerdo con Jiménez (1999) los programas tecnológicos para la producción de piña que existen en Costa Rica, no han sido desarrollados en este país, sino que son el resultado de transferencias tecnológicas iniciada por transnacionales.

Otros medianos y grandes productores han hecho únicamente modificaciones en cuanto a dosis y frecuencias de aplicación. Sin embargo, en lo que respecta a las fuentes fertilizantes utilizadas no existe mayor variación.

De esta forma un programa de fertilización convencional para el cultivo de piña, puede estar conformado hasta 70% por aspersiones fertilizantes de macroelementos, usualmente los microelementos se asperjan en su totalidad, Py *et al.* (1987), Jiménez (1999), Bartholomew *et al.* (2002).

Debido a lo anterior, mediante la disolución de altas cantidades de sales sulfatadas y nítricas en altos volúmenes de agua, se logra evitar la fitotoxicidad del cultivo debida a la saturación; además que es una forma práctica para llevar dichas sales hasta el punto de inserción de las hojas, en este último aspecto (Bartholomew *et al.* 2002) mencionan que es el sitio donde se lleva a cabo gran parte de la absorción mineral producto de la naturaleza bromeliacea de la planta de piña.

En cuanto a los requerimientos nutricionales de la planta de piña para Costa Rica, solo Bertsch (2003) reporta una curva de absorción para la variedad MD-2, la cual hace referencia a los elementos N, P, K, Ca, Mg y S, que son los que se aportan en mayor cantidad al cultivo en los programas de fertilización, aunque el azufre en realidad es consecuencia de la utilización de fuentes sulfatadas para el aporte de magnesio, hierro y zinc, sin embargo no hay datos de la absorción del hierro en este cultivo para las condiciones de Costa Rica.

Es por esta razón que el alto costo de los programas de fertilización, las exigencias de calidad e inocuidad del mercado internacional así como las normas de certificación, y la misma conciencia de los profesionales en ciencias agrícolas responsables de la producción, hace necesario que en este cultivo sea revisada la necesidad técnica real de cada insumo y

dosis que se utiliza en la producción y que provocan un impacto ambiental en el agroecosistema.

Para comprender las ideas anteriormente expuestas es necesario considerar que en general, las plantaciones de piña del país están sobre suelos de baja fertilidad, clasificados como ultisoles, inceptisoles y oxisoles. En estos suelos es frecuente encontrar niveles variados de los elementos hierro y manganeso, razón por la cual la planta de piña en teoría debería absorber mayor cantidad del elemento que esté más disponible en el suelo. Por otra parte, Bertsch (1998) y Kass (1998), Fassbender y Bornemisza (1987), reportan efectos antagónicos para la absorción entre ambos elementos.

Por lo anterior, es necesario evaluar la relación entre los valores de hierro disponible que se obtiene de las metodologías de cuantificación tradicionales y el valor de hierro que absorbe la planta de piña, expresados mediante análisis foliar.

Además es importante considerar otras metodologías de cuantificación de hierro biodisponible, adicionales a las que se emplean tradicionalmente en los laboratorios de suelos del país, buscando una mejor correlación entre el contenido del suelo y el contenido foliar y se convierta en una herramienta útil para inferir sobre posibles necesidades de aporte nutricional de este elemento al cultivo de piña, justificando o descartando de esta forma la práctica de fertilización con sulfato de hierro en algunos suelos con determinadas características químicas y microbiológicas.

Debido a los argumentos expuestos, este proyecto plantea evaluar la necesidad de las aspersiones de hierro al cultivo, teniendo presente que delimitando su empleo en áreas de condiciones específicas, la reducción en su uso podría significar un beneficio ambiental, un ahorro y por ende una mayor rentabilidad de la actividad; así como una primer apertura y concientización sobre la necesidad de revisar cada insumo, dosis y práctica agronómica del manejo tecnológico de este cultivo de tanto impacto ambiental para el país.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1 Objetivo general

Evaluar la necesidad del suplemento de hierro en el cultivo de piña *Ananas comosus* (L) Merr, Híbrido MD-2 en tres órdenes de suelo de San Carlos y Sarapiquí de Costa Rica.

2.2 Objetivos específicos

1. Realizar el mapeo de la distribución de hierro en tres fincas de piña de Banacol de Costa Rica, para seleccionar áreas que presenten valores altos, medios y bajos de hierro biodisponible.
2. Estimar el contenido de hierro en el suelo y sus formas mediante la determinación de fracciones del elemento, la biodisponibilidad y su relación con la actividad microbiana.
3. Determinar la relación entre el contenido de hierro en la hoja D de plantas piña, la actividad microbiana y las distintas fracciones del elemento en el suelo.
4. Evaluar el efecto de aspersiones con sulfato de hierro sobre el contenido de hierro en la hoja D de piña producida en tres suelos con diferente concentración de hierro extraíbles con Mehlich 3.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Aspectos generales del cultivo de piña

La piña es la tercera fruta tropical más importante en el mundo, después del banano y los cítricos. Previo al descubrimiento de la fruta de piña en los viajes de Cristóbal Colón en 1493, la fruta era ya un componente estable de los cultivos y dieta de los nativos americanos de las tierras bajas del trópico Bartholomew *et al.* (2002).

De acuerdo con Okihiro (2009), la piña se propagó a través de cultivo en América del Sur y Cristobal Colón la distribuyó en toda América del Sur y Centroamérica, el sur de México y el Caribe. De acuerdo a este autor posiblemente Colón tomó una muestra durante su regreso a Europa y los españoles la introdujeron en las Filipinas. En Hawaii se introdujo a principios de siglo XIX, obteniéndose así la primera plantación comercial en 1886.

De acuerdo con Py *et al.* (1987) y Bartholomew *et al.* (2002), la piña comestible se clasifica taxonómicamente en el orden *Bromeliales*, de la familia *Bromeliaceae*, subfamilia *Bromelioideae*, género *Ananas*; Especie: *A. comosus*, como la más conocida en el trópico.

Tradicionalmente en Costa Rica se sembró la variedad Monte Lirio para consumo local en sitios de Alajuela y Heredia, pero no fue hasta en la década de 1950 que inmigrantes italianos iniciaron las siembras de piña en las sabanas de Buenos Aires de Puntarenas. Posteriormente, la empresa Del Campo en la década de los sesenta pretendía desarrollar el cultivo para sus procesos industriales, sin embargo, fue la trasnacional Del Monte que en 1979 adquirió las áreas de piña de Del Campo y otras áreas agrícolas, la que inició un proyecto de 2500 hectáreas para establecer un programa de exportación de fruta fresca (Jiménez 1999).

A partir de 1982 y durante 8 años, Del Monte mantuvo la exclusividad del clon Ch F 153. Este clon es conocido como Champaka y para finales de la década de los noventa, en el

país existían alrededor de 5000 hectáreas de piña, 60% de las cuales era de esta variedad y 40% del híbrido MD-2 del cual solo Del Monte exportaba (Jiménez 1999).

Según Del Monte (2006), fue el lanzamiento de la variedad Del Monte Gold o Extra Dulce en 1996 que aumentó de manera significativa las ventas de piña fresca. A su vez, menciona que esta variedad fue desarrollada originalmente en Hawai como un probable híbrido destinado a la industria conservera debido a su peculiar forma de “hombros cuadrados”, pero resultó ser incompatible con el clima hawaiano, razón por la cual los ensayos fueron trasladados a Costa Rica a mediados de los años 1980's. En 1989 Del Monte comenzó a plantar unas pocas hectáreas que resultaron en el descubrimiento de la nueva variedad. Donde después de 10 años de investigación y cuidado de propagación, Del Monte Gold se convirtió en la variedad de piña fresca más vendida en el mundo.

3.2 Anatomía y fisiología de la piña y su relación con el suministro de nutrientes

A continuación se describen los principales órganos de la planta relacionados con la nutrición del cultivo.

3.2.1 La raíz de la planta de piña

Py *et al.* (1987), indica que cuando los hijos son cosechados, los primordios radicales son visibles entre las hojas más viejas ubicadas en la base del tallo y que existe una correlación entre el número de primordios y el peso del hijo. Este autor menciona que después de la siembra es posible distinguir tres estados de crecimiento de las raíces. El primero es un estado de crecimiento rápido y corresponde al potencial de crecimiento específico del tallo. El segundo o intermedio estado es de lento crecimiento; en condiciones naturales la duración de esta fase depende de las condiciones del clima. El tercer estado es más rápido y es cuando la planta reanuda su crecimiento; el tiempo de duración de esta fase depende

de las condiciones ambientales. En soluciones nutritivas ocurre a los 3 meses, y bajo condiciones naturales alrededor de los 5 – 6 meses.

De acuerdo con Py *et al.* (1987), la diferenciación de las raíces (al igual que la diferenciación de las hojas) continúa durante el almacenamiento (llenado del fruto). Adicionalmente comenta que la morfología de la raíz está determinada por el tipo de retoño "hijo" usado. En este sentido menciona que: *hijos guías* tienen pocas raíces y un alto punto de inserción en el tallo cuanto más inferior es el geotropismo del hijo. En *hijos basales* las raíces emergen ligeramente más rápido en las partes inferiores del tallo y emergen radialmente en relación al tallo. Los *hijos corona* tienen mayor cantidad de raíces las cuales son generalmente horizontales y solo ligeramente ramificadas. Estos autores reportan datos que muestran que en promedio crecen 39 raíces por planta de *semilla corona*, 15 raíces de *semilla basal* y solo 5 raíces de *semilla guía*.

Py *et al.* (1987), cita a Bonzon (1969), el cual reportó un promedio de crecimiento de 4,4 cm/semana, con un máximo de 6,7 cm/semana en Costa de Marfil, menciona además que Sideris *et al.* (1943), encontraron que una planta puede producir vigorosas raíces de hasta 1,8 m de longitud en menos de un año. Y como algo de importancia menciona a Carter (1948), el cual reportó que el primer síntoma de la enfermedad del Wilt es que la elongación de las raíces se detiene.

Estos autores mencionan que la masa radicular se incrementa relativamente más rápido que la masa foliar después de la siembra. Consideran que el desarrollo del sistema radicular es indispensable para la reanudación del crecimiento y que existe una correlación entre el número de raíces y el peso de la planta poco tiempo después de la siembra. Reportan que aparentemente la masa radicular continúa incrementándose a través de la vida de la planta y especialmente posterior a la iniciación floral, sin embargo Bartholomew *et al.* (2002), comenta que la producción de raíces decrece posterior a la inducción de la floración, no

obstante ambos autores concuerdan en que existen pocos datos sobre este tema, y particularmente en lo que concierne al crecimiento después de que la primera fruta ha sido cosechada, es decir no se conoce bien el comportamiento radical en la planta madre de las segundas cosechas.

Py *et al.* (1987) y Bartholomew *et al.* (2002) son autores que dan importancia a la raíz del cultivo de piña. En particular los primeros, recalcan, que el crecimiento de la raíz depende de diferentes factores físicos y biológicos en el medio ambiente inmediato y que la sensibilidad de la raíz a condiciones desfavorables muchas veces limitan el lapso de vida de la planta, esto concuerda con los hallazgos de Obregón y Mata (2008) y Vásquez (2009), referentes a la incidencia de enfermedades en la variedad MD-2 en Costa Rica, debida a infecciones fúngicas relacionadas con problemas de sanidad de la raíz por factores físico químicos no aptos o inadecuados acondicionamientos del suelo para el cultivo de la piña.

De acuerdo con Py *et al.* (1987) la calidad del suelo debe ser evaluada en relación con las características de la planta que se producen en él así como el clima. Consideran además que la morfología de la raíz depende en gran medida de las características físicas del suelo, raíces aéreas alrededor del tallo en la base de las hojas, son amplias, no ramificadas y con numerosos pelos absorbentes, raíces similares se producen cuando el suelo está protegido por acolchado plástico, estas condiciones de constante y activa humedad regulan el crecimiento radicular. El número de raíces es la misma, pero más largas. Afirman que la aireación de los suelos y la regulación de la humedad son condiciones previas para el buen crecimiento de las raíces. En suelos bien aireados y sin exceso de agua, las raíces pueden crecer hasta 60 cm o incluso más. Reportan que en suelos ferralíticos de Costa de Marfil, una densidad aparente de 1,4 g / ml reduce la elongación de las raíces y también afecta la morfología y anatomía de la raíz, aumenta la cantidad de médula y aerénquima y reduce la longitud de la cofia. La discontinuidad de la densidad en el perfil del suelo resulta en una

reducción de la elongación de las raíces, se modifica la difusión de agua, incluyendo las sustancias en solución (elementos minerales, plaguicidas, excreciones de la raíz) y gases (atmósfera del suelo, plaguicidas). Los pelos radicales son incluso más sensibles que las raíces, y la actividad de la raíz dependerá de la capacidad de los pelos para funcionar satisfactoriamente e incluso más, de sobrevivir. Trabajos en hidroponía muestran que el crecimiento de la raíz de piña fue más satisfactorio cuando las raíces fueron expuestas al aire durante 2 horas al día. Por otra parte, aunque las reacciones de la planta de piña al exceso de agua están comenzando a ser estudiadas con más detalle, se sabe que el cultivo produce más aerénquima y se asemeja al desarrollo de las plantas en caso de suelos compactos.

3.2.2 Las hojas de la planta de piña

De acuerdo con Bartholomew *et al.* (2002), las hojas seniles adjuntas al tallo son de dos tercios de su circunferencia. La filotaxia varía, siendo 5/13 en cultivos de piña (frutos grandes) y 3/8 en las plantas de piña silvestres (frutos pequeños). Estos autores reportan que el número de hojas es variable entre cultivares, pero generalmente oscila entre 40 y 80. Las hojas bajas se originan del material de siembra y son más pequeñas (entre 5-20 cm), comparadas con las más jóvenes que pueden alcanzar más de 1,6 m de largo y 7 cm de ancho dependiendo del cultivar y las condiciones ecológicas. Las hojas apicales son cortas y erectas. En general las hojas son ensiformes y excepto las apicales más jóvenes, son anchas en su base, con forma de vaina no clorofilada alrededor del tallo. La constricción entre la vaina y la hoja es más marcada en especies silvestres de piña. Temporadas de stress durante el crecimiento de la hoja puede causar variaciones en la anchura, formación de espinas o ambas a lo largo de la lámina foliar. Los márgenes de la hoja son usualmente espinosos, sin embargo ciertos cultivares son parcial o totalmente lisos.

Py *et al.* (1987) definen que el crecimiento de la masa total de hojas comprende dos etapas: a) un incremento en el número de hojas vivas en la planta, b) crecimiento individual de las hojas. Comentan que hasta la iniciación de la floración las hojas representan 90% del peso fresco de la planta, sin incluir las raíces, y cuando la fruta es cosechada estas representan aproximadamente el 50%. Por esta razón, el crecimiento de las hojas es frecuentemente considerado junto con el crecimiento del tallo como un todo (al menos durante el crecimiento vegetativo), sin embargo el rol fisiológico que juega el tallo puede ser significativo, especialmente en ciertas fases.

El intervalo entre la diferenciación y la aparición de las hojas no es constante y puede ser mayor de 4 meses. Las hojas que aparecen antes de la inducción de la floración a menudo se encuentran localizadas sobre el pedúnculo de la flor por lo que su crecimiento se verá limitado. Por contraste las hojas jóvenes visibles cuando la semilla es plantada a menudo están vivas cuando la fruta es cosechada, especialmente en el caso de semilla guía. Esto quiere decir que tiene una vida de más de 15 meses (Bartholomew *et al.* 2002).

La curva de crecimiento de la hoja es sigmoidea. En África ecuatorial las hojas alcanzan su mayor longitud y máximo peso fresco aproximadamente a los 4 meses después de aparecer la hoja en el corazón de la roseta. Este intervalo es muy constante en relación con los principales factores que influyen la intensidad del crecimiento. Los caracteres biométricos de la hoja alcanzan su mayor valor cuando los bordes de la base de la hoja son paralelos y perpendiculares a la línea de inserción en el tallo. El mismo período es necesario para un balance entre el ancho de la hoja y la circunferencia del tallo. La base de hojas jóvenes forman un ángulo de más de 90°; la base de hojas viejas forman un ángulo de menos de 90° porque la circunferencia del tallo continúa incrementándose (Py *et al.* 1987).

Sideris et al. (1936), definieron la hoja D como la hoja más larga. Consideran que siempre es posible determinar la hoja más larga de la planta, independientemente de su fase de

desarrollo, en cuyo caso esta hoja puede o no haber terminado su crecimiento. Esto se ha convertido en un importante aspecto práctico para el monitoreo nutricional del cultivo, ya que de acuerdo con Jiménez (1999) en Costa Rica esta hoja es la que se utiliza para hacer los análisis foliares.

3.2.3 El sistema axilar de la planta de piña

Bartholomew *et al.* (1987) indican que las hojas de la planta de piña son semi-rígidas gracias a su sección en forma de semiluna y como en otras bromelias eso le permite a la planta recoger agua en la roseta de hojas y absorber por las raíces aéreas presentes a lo largo del tallo dentro de la epidermis de las vainas. El haz de la hoja es cóncavo de color verde o verde oscuro, rojizo o púrpura dependiendo del cultivar y/o las condiciones ambientales. El envés es convexo con una superficie con surcos corrugados. Ambos lados están cubiertos por tricomas, particularmente el lado abaxial, que tiene una alta densidad.

Las láminas fibrosas de las hojas le confieren a la planta de piña una alta resistencia a sustancias o condiciones irritantes o abrasivas como la saturación con sales. En muchas especies de bromelias las células muertas de la epidermis pueden absorber agua y nutrientes y llevarlas al interior de los tejidos de la hoja (Bartholomew *et al.* 2002).

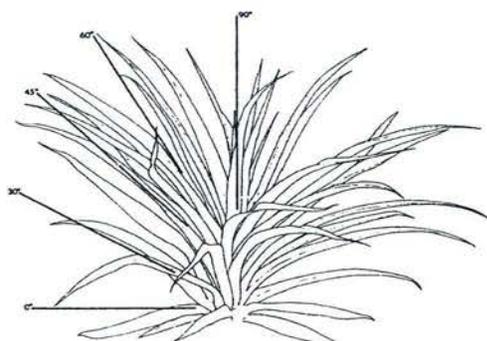


Figura 1. Arquitectura de la planta de piña.
Fuente: Py *et al.* (1987).

Py *et al.* (1987), mencionan en cuanto a la disposición de las hojas en la planta de piña que generalmente las hojas con el mayor peso, emergen de 2 a 4 meses de edad y que estas hojas forman un ángulo de 45° a 60° (Figura 1) con el suelo y están menos afectadas por la sombra que le provocan otras hojas y consecuentemente interceptan más luz disponible, siendo más responsables aún de la actividad fotosintética. Esto también significa que durante la formación de la fruta, estas hojas junto con el tallo, contribuyen más al llenado del fruto.

3.3 Requerimientos climatoedáficos del cultivo de piña

Estudios de Malézieux *et al.* (2002) indican que la piña se cultiva desde los 28° Latitud Norte hasta los 33° 58' Latitud Sur. Estos autores mencionan que la piña pocas veces requiere menos de 12 meses para completar su ciclo (siembra-cosecha), y más comúnmente la duración del ciclo es de 18-24 meses e incluso hasta 36 meses en ambientes fríos subtropicales.

Las altas productividades del cultivo de piña dependen del éxito que se tenga en el manejo de los factores controlables, como el suministro de agua y nutrientes, además del control de plagas invertebradas y enfermedades. Factores ambientales como temperatura, irradiación y precipitación interactúan con el mecanismo CAM de las plantas, y las extraordinarias características morfológicas y anatómicas de la piña finalmente determinan la productividad dentro de un ambiente dado (Malézieux *et al.* 2002).

3.3.1 Temperatura

El metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, del inglés, *Crassulacean Acid Metabolism*) debe su nombre a que se descubrió por primera vez en plantas de la familia de las crasuláceas, aunque no es exclusivo de dicho grupo. El nombre de metabolismo ácido hace referencia a la acumulación de ácidos orgánicos (ácido málico, cítrico, isocítrico, y trazas de

ácido aspártico y glutámico) durante la noche por las plantas que poseen este mecanismo de fijación de carbono. En cualquier caso, la fotosíntesis CAM va asociada normalmente con hojas de anatomía suculenta, con grandes vacuolas llenas de agua (Azcón-Bieto y Talón 2000).

En las plantas CAM la carboxilación C_4 , mediada por la PEP carboxilasa, tiene lugar durante la noche en las células del mesófilo. El oxalacetato formado es transformado en malato, forma en que se acumula el carbono durante la noche en estas plantas. Esta transformación conlleva un gasto de poder reductor y es mediada por la enzima malato deshidrogenasa dependiente de NAD^+ . El malato acumulado se almacena en las vacuolas, que son de gran tamaño en las células de plantas CAM, pudiendo ocupar más del 95% del volumen celular. La concentración de malato al final de la noche suele ser muy alta (>0.2 M), lo que confiere a estas hojas un cierto sabor ácido al amanecer. Durante el día, el malato se libera de la vacuola y es descarboxilado a piruvato mediante una de las tres enzimas, que cumplen idéntica función en las plantas C_4 (enzima málica dependiente de NAD^+ , enzima málica dependiente de $NADP^+$ o PEP carboxiquinasa, según la especie). Esta descarboxilación lleva consigo la liberación de CO_2 . De este modo, al igual que ocurriría en las plantas C_4 , las plantas CAM incrementan la concentración de CO_2 en el lugar activo de la RUBISCO. El piruvato resultante se transforma en almidón. Durante la noche siguiente el almidón origina por glucólisis, moléculas de fosfoenolpiruvato que constituyen el sustrato de la carboxilación por PEP carboxilasa, cerrándose así el ciclo. La separación temporal de los procesos fotosintéticos en las plantas CAM hace que la asimilación del carbono tenga lugar durante la noche, cuando la demanda atmosférica de agua es muy baja. De este modo pueden mantener los estomas abiertos sin apenas pérdida de agua y cerrar los estomas durante el día, cuando la demanda atmosférica es alta. Por tal motivo, la fotosíntesis CAM se asocia con una elevada eficiencia en el uso del agua (Azcón-Bieto y Talón 2000).

De acuerdo con Py *et al.* (1987), si no existe déficit de agua, el termo período determina la actividad CAM de la piña.

Estudios realizados por Malézieux *et al.* (2002), revelan que temperaturas extremas sobre las hojas de piña causaron daños no permanentes, pero que sus efectos específicos sobre los procesos fisiológicos no han sido estudiados; no obstante, consideran que los efectos de la temperatura sobre la conductancia estomática son significativos.

Estudios citados por Py *et al.* (1987), sobre puntos de compensación de dióxido de carbono incorporando carbono 13 y fenómenos asociados a la foto respiración, muestran que los ciclos C₃ y C₄ son usados también por la planta de piña, y reportan las fases de fijación de CO₂ de la siguiente forma:

- Fase nocturna: asimilación de CO₂; almacenamiento de malato.
- Inicio de la fase diurna: dependiendo de cuando los estomas se cierran, la asimilación de CO₂ puede continuar y la descarboxilación de malato es inmediata: "Ciclo C4".
- Medio día: los estomas se cierran; descarboxilación de malato.
- Final del día: la vía C₃, dependiendo de que tan temprano los estomas se abren.

El balance entre los diferentes caminos metabólicos tiene una influencia considerable sobre la calidad de la fruta, como azúcares y ácidos orgánicos. Los principales factores en la determinación de la calidad de la fruta están íntimamente relacionados con el metabolismo CAM. Esto explica las marcadas variaciones en la composición de la fruta, particularmente como una función del clima (Py *et al.* 1987).

Bartholomew *et al.* (2002) encontraron temperaturas de 30/26 °C, para el día y la noche respectivamente, como las de mejor respuesta en términos de ganancia de peso seco de la planta.

Dagoon (2005), indica que la temperatura media anual debe estar entre 24 y 30 °C. Comenta que regiones entre 25° latitud norte y 25° latitud sur del Ecuador se

consideran especialmente favorables para el cultivo de la piña. Dado que la piña es sensible a las heladas y los vientos fríos, no debe ser plantada en las elevaciones que excedan 690 metros de altura.

Py *et al.* (1987) reportan que, en regiones que están constantemente calientes y húmedas (baja altitud, regiones cerca del Ecuador), la masa foliar es considerable y siempre abundante. Las hojas son anchas, numerosas y muchas veces flácidas. El margen de la hoja es filoso y algunas veces ondulado durante etapas tempranas de crecimiento. En regiones altas las temperaturas son bajas y el crecimiento lento, las hojas son rectas, más rígidas, cortas y no muy abundantes. Entre estos extremos existe un rango de variaciones intermedias. La tasa por la cual las hojas aparecen es también influenciada por la temperatura. Estos autores reportan que el número de hojas (N) que aparecen en un mes está relacionado, bajo condiciones experimentales con el promedio mensual de temperatura (T) por la relación:

$$N = 18,125 \times \log_{10} T / 11,669$$

En el trópico, la variación de la temperatura media mensual es de 5° C o menos, la diferencia entre la media de los 3 meses más calientes (enero, febrero y marzo) y los 3 meses más fríos (octubre, noviembre y diciembre) es lo que da 5 °C (Jiménez 2001).

3.3.2 Radiación solar y fotoperíodo

Py *et al.* (1987) reportan que la radiación solar tiene un efecto directo en las reacciones fotosintéticas y sobre la temperatura de las hojas. Adicionalmente comentan que una cantidad mínima de radiación solar es necesaria para causar la descarboxilación total de los ácidos y que la completa descarboxilación es indispensable para la absorción durante la subsiguiente fase nocturna; donde la cantidad de absorción es directamente proporcional a la cantidad de energía solar previamente absorbida.

La habilidad de los estomas para abrirse o cerrarse permite que la transpiración disminuya cuando no se está efectuando la fotosíntesis (Salisbury y Parke 1968).

Cuando el metabolismo es estrictamente CAM, debido a la amplitud térmica del follaje, sin déficit de agua y sin viento y la radiación solar total intensa, el mantenimiento del termoperíodo es sencillo. Pero un decrecimiento en la radiación solar total puede causar la apertura diurna de los estomas. Una situación de este tipo puede ocurrir cuando se utiliza la irrigación y la sombra, promoviendo la asimilación diurna del CO₂ por la reducción de la temperatura de las hojas. Sin embargo, si el metabolismo es solo parcialmente CAM, y sin déficit de agua y si la amplitud térmica de las hojas no es excesiva; una intensa radiación solar total en realidad hace posible la apertura diurna de los estomas, por medio de la rápida disipación de CO₂ interno como resultado de una rápida descarboxilación. En términos generales se dice que esta situación es la más favorable para la fotosíntesis Py *et al.* (1987). Estos investigadores obtuvieron bajo condiciones experimentales de 11,5 horas luz y con temperaturas de 30 a 26,5 °C día/noche respectivamente que la absorción de CO₂ aumenta con incrementos de la intensidad lumínica y resulta en la producción de más materia seca. Adicionalmente comentan que la producción de materia seca se ve limitada por intensidades lumínicas de menos de 30 klux.

En ambientes naturales, las hojas de las plantas que se desarrollan con poca radiación solar son largas, erectas y verde oscuro, mientras que las plantas que se desarrollan con alta radiación solar son rojizas o incluso amarillas (Bartholomew *et al.* 2003).

3.3.3 Precipitación

La piña puede desarrollarse en áreas con lluvias que varían desde 600 mm año⁻¹, con una estación seca de varios meses, hasta 3500 mm o 4000 mm año⁻¹. La adaptabilidad de la piña a diferentes regímenes es muy notable y esta capacidad de sobrevivir a pronunciados y prolongados periodos de estrés hídrico es muy destacada (Py *et al.* 1987). Estos autores

reportan que en Hawai se obtuvieron altas producciones con una evaporación de 1850 mm año⁻¹ y lluvias anuales de solo 1000 mm año⁻¹. Sin embargo en otros estudios encontraron que después de varios meses continuos de sequía el crecimiento se detiene, reportan siembras de regiones bajas de Guinea donde encontraron que el crecimiento vegetativo se detiene de 3 a 3,5 meses durante 5 meses de estación seca, en comparación con plantas con suministro normal de agua.

Por su parte Dagoon (2005) indica que la piña es muy resistente a la sequía, pero considera óptimo precipitaciones de 1.100 – 1.300 mm anuales.

3.3.4 Suelo

Bartholomew *et al.* (2002) mencionan que la piña se adapta bien a suelos ácidos, donde el pH de 4,5 a 5,5 reduce la incidencia de enfermedades que provienen del suelo; mencionan que es preferible evitar suelos con pH superiores a 7.0, indican que la piña tolera suelos de baja fertilidad, pero que las mejores producciones son obtenidas de suelos con alta fertilidad; afirman además que la piña tolera altos niveles de aluminio soluble y manganeso y que son deseados suelos con altos contenidos de materia orgánica y potasio.

Topografía

Bartholomew *et al.* (2002) mencionan que lo más importante a considerar en este sentido es la erosión, en cuanto al cultivo de piña debería seleccionarse los terrenos menos inclinados. Reportan que cuando las labores son manuales se han seleccionado terrenos extremadamente inclinados y cuando las labores son mecanizadas deben seleccionarse terrenos más planos. Reportan siembras en Australia en terrenos con 40% de pendiente con buenos resultados productivos pero con altas pérdidas de suelo por erosión.

Textura

La calidad del suelo puede ser evaluada en relación con las características de crecimiento de las plantas y el clima. La morfología de las raíces depende en alto grado de las características físicas del suelo. El sistema radical adventicio se encuentra alrededor del tallo en la base de las hojas, es extenso, sin ramificaciones y posee numerosos pelos absorbentes. Raíces similares se producen si el suelo está cubierto con plástico. Bajo estas condiciones de constante humedad se fomenta el normal crecimiento y la mayor actividad (Py *et al.* 1987). Este autor menciona que en suelos bien aireados, sin excesos de humedad, las raíces pueden desarrollar hasta más de 60 cm de longitud. Aunque esto no es posible en arenas ferralíticas donde una densidad aparente de 1.4 g ml^{-1} reduce considerablemente la elongación de las raíces y también afecta la morfología y la anatomía, incrementando la cantidad de médula y aerénquima y reduciendo el largo de las raíces.

De acuerdo con Bartholomew *et al.* (2002) un suelo ideal para el cultivo de piña debe ser alto en contenido de materia orgánica, con excelente drenaje interno y alta aireación, que provea una óptima cantidad de agua, nutrientes y oxígeno a las raíces.

La naturaleza mineralógica de la arcilla determina su capacidad de retención de agua, su plasticidad y cohesión. Suelos ricos en arcilla, sensibles a la compactación, no son adecuados y también pueden fomentar la pudrición causada por *Phytophthora* sp. Suelos con alto porcentaje de arena son ideales, sin embargo pueden presentar problemas de reservas de agua y son sensibles a la erosión y compactación lo que hace que se requieran técnicas de cultivo adecuadas (Ducreux *et al.* 1980, citado por Py *et al.* 1987).

La permeabilidad depende principalmente de la porosidad, de esta forma la circulación del aire y el agua se lleva a cabo a través de los poros más grandes (macroporosidad) mientras que los poros más pequeños (microporosidad) almacenan el agua que alimenta la planta y asegura la supervivencia de las raíces. La forma en que las partículas elementales están

asociadas, es decir, la estructura del suelo, determina las cualidades de porosidad. En todos los casos el agua es el agente activo para cualquier modificación de la estabilidad estructural (Moreau 1978, citado por Py *et al.* 1987).

Fertilidad

Desde el punto de vista químico, la acidez del suelo (pH) es la característica más relevante para el cultivo de piña. En ambientes controlados (de solución nutritiva) el potasio es más activamente absorbido que el calcio, y los nitratos más que los sulfatos, lo que resulta en la acidificación de la solución nutritiva sin tomar en cuenta el pH inicial, el cual influye en el crecimiento de la raíz y el crecimiento de la planta como un todo (Py *et al.* 1987). También indican que todos los estudios realizados a nivel de campo muestran que el pH óptimo está entre 4,50 y 5,50.

Partiendo del valor óptimo, la producción decrece más rápidamente con un incremento en la acidificación que con un incremento en la alcalinización (Py *et al.* 1987). Además reportan que el aluminio extraíble incrementa rápidamente con decrecimientos de pH por debajo de 4,5, lo cual puede explicar las reacciones de la planta aunque el umbral de tolerancia al aluminio no es conocido. Estos investigadores observaron que el pH alto limita el desarrollo radicular y causa el bloqueo de ciertos elementos traza. En consecuencia en lugares donde el origen del suelo explica las deficiencias o toxicidades el control del pH es el camino más efectivo para evitar la degradación del suelo y asegurar la óptima nutrición de elementos traza.

Bartholomew *et al.* (2002) consideran que la piña tiene elevadas necesidades de fertilizante N, K y Fe, y relativamente bajos requisitos de fertilizantes como fósforo (P) y calcio (Ca). Reportan que se necesita menos cantidad de fertilizante durante los primeros cinco meses después de la siembra; posteriormente los requerimientos aumentan obteniendo el pico después de dos a cuatro meses antes de la iniciación floral. El P y Ca pueden ser colocados

en la línea de las plantas durante la conformación de camas. El K es normalmente aplicado al suelo antes de plantar y más tarde puede ser asperjado. Indican que los otros nutrientes, y a veces K se incluyen en las aplicaciones de pulverizaciones foliares o a través del sistema de riego por goteo, o por ambos métodos, durante el crecimiento de las plantas. Estos autores consideran que la necesidad de aplicaciones de fertilizantes al suelo es determinada mediante análisis de suelo. Reportan que en Hawai el Ca no es necesario que se aplique si el pH del suelo es mayor a 4.6 cmol/L, debido a que la planta tiene bajos requerimientos de Ca. Consideran que si los suelos son bajos en P, se deben incorporar o aplicar en bandas aproximadamente 75 kg / ha de P. Reportan que aplicaciones de estiércol de animales puede reducir la necesidad de suplementos de aplicaciones de Fe y otros micronutrientes.

Recomendaciones de Bartholomew *et al.* (2002) indican que el volumen de solución de fertilizante aplicado foliarmente a la piña varía con la población de plantas, la etapa de crecimiento, y la cantidad de fertilizantes que se aplican. Las concentraciones de aspersion en el fertilizante aplicado debe ser cuidadosamente calculado para evitar concentraciones que quemen las plantas. La técnica de bajo volumen de aspersion 250-500 litros / ha se dirige a la parte verde de las hojas, lo que permite poca o ninguna concentración en las axilas. La absorción de nutrientes es a través del tejido verde foliar, en este caso las concentración de sales pueden ser tan altas como 20 por ciento en peso. A medio volumen las aspersion son de 500-2500 litros / ha y son dirigidas a la parte verde de las hojas, con acumulación en las axilas de estas, pero con poca o ninguna difusión al suelo, en este caso la absorción es a través del tejido verde foliar, el tejido blanco basal de las hojas, las raíces cerca de la axila y la base del tallo, para este caso la máxima concentración de sal es de 5 por ciento. Las aspersiones de alto volumen son superiores a 2500 litros / ha son similar al volumen medio excepto en que en este caso si existe difusión de la solución de fertilizante

en el suelo en la base de la planta. Por último recomiendan que la urea no es fitotóxica en concentraciones tan altas como 20 por ciento pero cuando se aplica a los tejidos de hoja verde solamente y que debe contener menos del 1 por ciento de biuret, mencionan que la concentración de fertilizantes en la solución no debe exceder el 1 por ciento de hierro y el 0,1 por ciento de sulfato de zinc.

3.4 Dinámica del hierro en las plantas

Dependiendo del ligando el potencial redox de Fe (II/III) varía completamente. Esta variabilidad toma una especial importancia en los sistemas biológicos de oxidación/reducción. La alta afinidad del hierro por varios ligandos, por ejemplo, ácidos orgánicos o fosfatos inorgánicos hace poco probable que los iones de Fe^{3+} o Fe^{2+} sean de importancia en el transporte a cortas o largas distancias en las plantas (Marschner 1986).

El hierro pertenece al grupo de elementos esenciales denominados elementos traza, oligoelementos o micronutrientes (porque se necesitan en concentraciones de tejido iguales o menores a 100 mg/kg de materia seca). Las concentraciones internas que se estiman como "adecuadas" sólo deberían considerarse como normas de utilidad, debido a la variabilidad que existe entre especies y las etapas de crecimiento de los vegetales (Salisbury y Ross 2000).

Azcón-Bieto y Talón (2000), comentan que entre todos los microelementos, el hierro es el requerido en mayor cantidad; afirman que para algunas plantas se le llega a considerar macronutriente. Puede ser absorbido como Fe^{3+} y más fácilmente, dada su mayor solubilidad, como Fe^{2+} o ion ferroso.

Salisbury y Ross (2000) reportan que el hierro acumulado en las hojas más antiguas se encuentra relativamente inmóvil en el floema, igual que en el suelo, probablemente porque se precipita internamente en las células de las hojas en forma de óxido insoluble o de compuesto de fosfato férrico, orgánicos o inorgánicos. Hay pocas evidencias directas de que

se formen esos precipitados; quizás se puedan formar otros compuestos insolubles. En los cloroplastos se almacena en forma estable y abundante de hierro existente en las hojas, en forma de un complejo de hierro y proteína denominado fitoferritina. Cerca de 80% del hierro de las hojas se acumula en los cloroplastos como este complejo (Azcón-Bieto y Talón 2000). El acceso de hierro a la corriente de transporte del floema probablemente se minimiza debido a la formación de esos compuestos insolubles, aunque parece ser que la fitoferretina representa un almacén de hierro.

Yúfera y Dorrien (1973) reportan que en las células vivas la mayor parte del hierro se encuentra en forma de porfirinas, formando parte de muchas enzimas; en especial está asociado a la citocromo-oxidasa, que regula la respiración de las plantas.

Salisbury y Ross (2000) afirman que la importancia del Fe en la planta radica en dos importantes funciones:

- Forma parte de los grupos catalíticos de muchas enzimas redox del tipo hemoproteínas, como son: citocromos (tanto mitocondriales como cloroplásticos), catalasas, peroxidasas, que presentan un grupo hierro-porfirina como núcleo prostético, el grupo hemo.
- El Fe se encuentra unido a grupos tiónicos de la cisterna en otras proteínas, hierro-azufre, las sulfoferro proteínas. Estas proteínas son clave en la fotosíntesis, como es el caso de la ferredoxina, la nitroreductasa y la sulfito reductasa; en la fijación de nitrógeno – caso de la nitrogenasa – y en la respiración. Los estados redox Fe^{3+}/Fe^{2+} explican su presencia en estos sistemas enzimáticos, tanto de un tipo como de otro, al actuar como transportador de electrones en los mismos.

Existe, además, otra razón para la esencialidad del Fe que resulta exclusiva del mundo vegetal, y es su papel en la biosíntesis de la molécula de clorofila, ya que regula la actividad del sistema enzimático encargado de la formación del ácido δ -aminolevulínico (ALA),

precursor de las porfirinas, y el paso de protoporfirina- Mg a protoclorofila (Salisbury y Ross 2000).

3.5 Consideraciones generales sobre el suministro de hierro en el cultivo de piña

De acuerdo con Collins (1949) el hecho de que las plantaciones de piña de Hawai se rociaran a intervalos frecuentes con una solución débil de hierro, por lo general en forma de sulfato de hierro, es muy bien conocida. Sin embargo, este investigador considera que existen algunas ideas erróneas con respecto a este fenómeno. La más frecuente es que el suelo en las islas hawaianas no contiene hierro y que este elemento, por lo tanto, deberá suministrarse. No obstante, este autor considera que esto no es cierto, ya que el rojo de los suelos de Hawai y que comprenden una parte importante de la superficie terrestre, contiene alrededor de 20 por ciento de hierro. Este alto contenido de hierro le da su color rojo.

En otras regiones donde la acidez del suelo es relativamente alta (pH 4), el hierro en el suelo es fácilmente disponible para las raíces de la piña. Collins (1949) considera que en estas áreas la fertilización de las plantas de piña con aspersiones de sulfato de hierro no son necesarias para el normal crecimiento, pero en zonas, principalmente con elevaciones inferiores a 300 metros y donde la acidez del suelo es relativamente baja (pH 5,6 - 7,0), la aplicación de hierro es necesaria para mantener el normal y vigoroso crecimiento de la planta.

Por su parte Bartholomew *et al.* (2002), consideran que la planta de piña posee una incapacidad propia para obtener hierro de suelos ricos en este elemento en determinadas condiciones y que no se comparte por otras plantas, incluidas las malas hierbas de los campos de piña, que crecen normalmente en estas mismas condiciones.

Algunos de los suelos de Hawai también contienen un porcentaje relativamente alto (5%) de manganeso, a esto Collins (1949) agrega que estos suelos interfieren en cierta medida con

la absorción y la utilización de hierro, y las plantas de piña se pueden mostrar cloróticas debido a la falta de suficiente hierro para producir una cantidad normal de clorofila.

Lo anterior indica que es necesario el diagnóstico del suelo para poder inferir sobre la necesidad o no del uso de aspersiones de hierro en el cultivo para corregir las carencias de este elemento y por ende que no en todos los suelos y condiciones de estos el suministro del elemento debe ser una regla.

3.6 Necesidades de hierro en el cultivo de piña

De acuerdo con Johnson (1928), el amarillamiento de las plantas de piña sobre suelos altos en manganeso de Hawai se reportó por primera vez en 1909. Reporta que en 1916 se encontró y llamó "intoxicación por manganeso" y fue una simple clorosis debida a una deficiencia de hierro en las plantas de piña, comenta que en este tiempo aspersiones sobre las plantas una vez al mes con 4 a 6 por ciento de una solución de sulfato de hierro proveía un muy simple y práctico medio de control. Este autor reporta que otros investigadores encontraron clorosis en plantas de piña en suelos de Puerto Rico que contenían excesivas cantidades de carbonato de calcio y que ésta desaparecía al asperjar sobre ellas soluciones de sales de hierro.

Johnson (1928), reporta que la clorosis del cultivo de piña en Hawai es diferente a la clorosis alcalina que se presenta en suelos excesivamente calcáreos, puesto que la clorosis de Hawai se presenta en suelos ácidos que no contienen carbonato de calcio y poseen únicamente cantidades normales de calcio. Este autor reporta que la disponibilidad de hierro en el suelo se debe como mínimo a dos influencias; en primer lugar la acidez o alcalinidad relativa del suelo y en segundo lugar agentes oxidantes o reductores del suelo. Reporta que suelos cuyo pH está por encima de 4.5 (que incluye la mayoría de suelos agrícolas) el hierro férrico aparece en gran parte indisponible para las plantas y sensible a clorosis y la fuente principal de abastecimiento de hierro son las sales ferrosas. Considera que el dióxido de

manganeso presente en los suelos piñeros de Hawai parecen mantener el hierro oxidado a la forma férrica no disponible, aunque estos suelos pueden tener cantidades tan altas como 25 por ciento de hierro como óxido de hierro. Este autor reporta que en estas condiciones aplicaciones tan fuertes de sulfato de hierro al suelo del orden de 3370 kg/ha proveen un inefectivo control de la clorosis, mientras que aspersiones sobre el cultivo de 11 kg/ha de sulfato de hierro por mes ha dado como resultados controles casi perfectos.

Sideris *et al.* (1943) indican que estudios sobre los requerimientos de hierro bajo las condiciones de Hawai se han hecho en varias ocasiones por distintos investigadores. Comentan que el consenso de la mayoría de los investigadores ha sido que el manganeso y el calcio, ya sea a través de la precipitación de hierro soluble en agua en el suelo o en los tejidos de la planta, fueron capaces de causar clorosis en piña. Otras condiciones, tales como diferentes grados de acidez del suelo puede favorecer o inhibir la solubilidad del hierro.

Kass (1998), indica que las áreas cultivadas de piña en Hawai, con suelos que contienen altas reservas de dióxido de manganeso (MnO_2) finamente disperso, persisten bajo condiciones de un pH de suelo alrededor de 6,0, porque la oxidación microbial se mantiene en equilibrio con la reducción generada por la fracción orgánica, lo cual de acuerdo a este autor es una evidencia de la importancia de tener una clara perspectiva de la química de los elementos transicionales en los suelos.

3.7 Fertilización con hierro en el cultivo de piña en el mundo

Autores como Py *et al.* (1987), Bartholomew *et al.* (2002), reportan trabajos e investigaciones en fertilización y nutrición del cultivo de piña en regiones como Hawai, Jamaica, Puerto Rico, Malasia, Guinea, Martinica, Costa de Marfil y Australia. Estos autores reportan diferentes requerimientos nutricionales del cultivo de acuerdo a las condiciones químicas particulares del suelo de cada región. Por ejemplo Py *et al.* (1987)

consideran que, desde el punto de vista químico, la acidez del suelo es la característica más relevante para el cultivo, reportan que todos los diferentes cultivares poseen necesidades casi idénticas, aunque Cayena Lisa parece ser capaz de adaptarse a una amplia gama de variaciones del pH que, por ejemplo, Española Roja.

Estos investigadores consideran que el conocimiento detallado de las relaciones entre el clima, el suelo, la planta y las técnicas utilizadas establece el marco de referencia para encontrar la exactitud de los requisitos nutricionales de la planta de piña.

De acuerdo con Dagoon (2005), la piña puede crecer en prácticamente cualquier tipo de suelo siempre que se cumplan las siguientes condiciones: (a) buen suministro de agua, saneamiento adecuado y una buena aireación, no debe haber capas duras en el subsuelo que puedan impedir el drenaje y causar anegamiento, indica que suelos muy arcillosos con muy mal drenaje no son adecuados para el cultivo de la piña. (b) el contenido de calcio del suelo no debe ser elevado; indica que la piña requiere suelo ligeramente ácido. Adicionalmente reporta que la reacción óptima del suelo para la piña se encuentra entre un pH de 5,5 y 6,2. Comenta que suelos calcáreos con alto valor de pH no son aptos para el cultivo de piña, ya que dará lugar a clorosis debido a la falta de hierro.

Los reportes tanto de Py *et al.* (1987), referentes a los programas de fertilización para el cultivo de piña en regiones como Costa de Marfil, Martinica y Australia, coinciden en que suelos de origen calcáreo requieren suministros de hierro para corregir las deficiencias que provoca la reacción de suelo (pH por encima de 6), dichas correcciones las sugieren en todos los casos mediante el uso de sulfatos de hierro en aspersiones foliares de alrededor de 25 kg en todo el ciclo de cultivo. Mientras que para suelos ferralíticos sus programas de fertilización no reflejan aplicaciones de sulfato de hierro en ninguna de las regiones con estas características. Por otra parte Bartholomew *et al.* (2002), reportan para suelos de Hawai donde el suministro de hierro puede estar severamente limitado, considerar

aplicaciones de hasta 140 kg/ha de sulfato de hierro. Estos mismo autores reportan que la piña no es capaz de extraer hierro de suelos con pH ácido si el hierro no es moderadamente disponible, en este caso recomiendan aspersiones con 5 -10 kg/ha de sulfato de hierro, y cuando los problemas son más graves comentan que 6 a 24 kg/ha son requeridos.

Recopilaciones generales de algunos autores, en cuanto al suministro de fertilizantes al cultivo de piña en Hawaii se pueden observar en Cuadro 1.

Cuadro 1. Suministro de nutrimentos al cultivo de piña de acuerdo con algunos investigadores.

Nutriente	Maui (1981)	Py <i>et al.</i> (1987) (Kg/ha)	Bartholomew <i>et al.</i> (2002) (Kg/ha)
N	721	579	500
P ₂ O ₅	133	127	171,8
K ₂ O	1358	1648	480
MgO	133	250	41,5
CaO	217	430*	nd
Fe	12,6	nd**	4,8
Zn	2,1	nd	2

*Datos estimados.

** Sin datos.

3.8 Fertilización con hierro en el cultivo de piña en Costa Rica

De acuerdo con Jiménez (1999) un programa de fertilización común en Costa Rica para el cultivo de piña con la introducción de la variedad MD-2, se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Programa de fertilización común para el cultivo de la piña en Costa Rica.

Nutriente	Al Suelo (Kg/ha)	Aspersión foliar (kg/ha)	Total (kg/ha)
N	304,13	460,87	765,00
P ₂ O ₅	216,00	0,00	216,00
K ₂ O	622,08	508,20	1130,28
MgO	17,28	0,00	17,28
Fe	0,00	34,30	34,30
Zn	0,00	5,40	5,40

Esta recomendación de Jiménez (1999) para Costa Rica representa hasta 170 kg de sulfato de hierro por ciclo de cultivo. Para conseguir este aporte nutricional Jiménez (1999) indica un total de 3 aplicaciones granuladas dirigidas al suelo en la base de la planta y un total de

24 aspersiones foliares iniciando a partir del primer mes y finalizando en el mes ocho donde se reporta la inducción de la floración.

De acuerdo con ABOPAC (2007) y RESUSA (2008) los programas de fertilización actuales para la variedad MD-2 en términos generales difieren básicamente al reportado por Jiménez (1999) en la cantidad de K_2O (actualmente se utiliza menor cantidad), reportan uso de calcio, boro y una mayor cantidad de magnesio tanto al suelo como por aspersión foliar. En cuanto a los microelementos hierro y zinc, se reportan variaciones leves en las cantidades utilizadas, no obstante no se reportan aplicaciones de manganeso, y aplicaciones de cobre y molibdeno son puntuales y muy esporádicas.

3.9 Disponibilidad de nutrientes en el suelo

Antiguamente el análisis de los suelos se limitaba casi exclusivamente a determinar las deficiencias (es decir, a la zona inferior de la escala de niveles de abastecimiento). Ello venía obligado por un desarrollo histórico que partía de los tiempos en que los suelos padecían una fuerte deficiencia nutritiva y se intentaba alcanzar un alto nivel de abastecimiento. Actualmente ha aumentado la importancia del diagnóstico correspondiente a la zona superior de la escala, sobre todo desde el punto de vista del ahorro de abono y del peligro de sobre-dosificaciones (por un abonado excesivo o por el enriquecimiento debido al sistema de eliminación de residuos) (Finck 1988).

De acuerdo con Finck (1988) el aporte de elementos minerales a las plantas depende del contenido de nutrimentos asimilables en el sustrato. Este contenido disponible puede ser determinado con métodos apropiados, y a partir de él puede obtenerse la dosis de abono que es necesario aplicar.

La importancia de la movilidad de los nutrientes en el suelo en relación con la disponibilidad para las plantas fue enfatizado en 1962, luego estas ideas fueron perfeccionadas,

desarrolladas y resumidas más adelante en el concepto de “biodisponibilidad de nutrientes” (Marschner 1986).

La forma más directa para determinar la disponibilidad de nutrientes en el suelo es realizando ensayos de fertilización y mediciones a plantas para determinar respuestas en el crecimiento. Este es un procedimiento que consume tiempo y a pesar de esto los resultados no son fácilmente extrapolables de un lugar a otro. En contraste los análisis químicos de suelo resultan en procedimientos comparativamente más rápidos y económicos para obtener información de disponibilidad de nutrientes como base para la recomendación de aplicación de fertilizantes al suelo. Los análisis de suelo han sido practicados en la agricultura y la horticultura por muchos años con relativo éxito (Marschner 1986). Adicionalmente este autor hace énfasis en que de los análisis de suelo se espera mucho más de lo que la misma metodología permite.

Finck (1988) comenta que en determinadas zonas después de demostrar la utilidad de métodos de análisis de suelo son convertidos finalmente en métodos normalizados (sin haberse contrastado su valor con el de otros métodos distintos) y afirma que eso explica el hecho de que algunos métodos de ensayo actuales no tengan el grado de seguridad que sería de esperar y hace énfasis en que es necesario contrastar los métodos para conocer su utilidad.

Estándares o medidas de contraste para determinar la utilidad de un método de análisis de suelo de Finck (1988).

– Contraste con la producción vegetal: es decir respecto a la producción relativa de ensayos de abonado de campo: p.ej., para el fosfato

$$\text{Rend} = \frac{\text{Rend sin abonado P}}{\text{Rend con abonado P}} * 100$$

– Contraste sobre la base del contenido de nutrimentos de la planta: en este sistema indirecto se utiliza, en lugar del rendimiento, el contenido de nutrimentos de la planta en un

estado de desarrollo apropiado. Este sistema es mucho más sencillo, y en muchos casos el único posible.

– Contraste con la aparición de síntomas de deficiencia: este sistema solo es adecuado para diferenciar las deficiencias agudas respecto de las latentes o de un buen suministro nutritivo. A pesar de esta desventaja puede utilizarse en ciertos casos.

Finalmente, Finck (1988) considera que debe establecerse la coincidencia entre el valor de la extracción y el valor contrastado. Con un método ideal, los contenidos de nutrimentos así determinados, coincidirían exactamente con el valor contrastado, es decir, se establecería una correlación o coeficiente de determinación (parámetro B) del 100%. Los métodos buenos deben alcanzar valores de (B) de 70% como mínimo. Lo anterior concuerda con Nelson (1999), quien considera necesario diseñar estudios específicos para calibrar los análisis de suelo con las respuestas de campo a la aplicación de fertilizantes.

3.10 Metodologías para determinar biodisponibilidad de hierro en Costa Rica

En Costa Rica las metodologías empleadas en los laboratorios nacionales para estos elementos son la KCI-Olsen Modificado y Mehlich 3, los cuales reportan para 70% de confiabilidad variaciones de hasta 30% (Corrales *et al.* 2006). Adicionalmente en trabajos de correlación entre estas soluciones extractoras, Bertsch *et al.* (2006) informan que se encuentra en proceso de análisis las correlaciones para el Fe, Mn y Cu; aunque ya se realizaron las correlaciones para Ca, Mg y K donde las correlaciones fueron satisfactorias, para el Zn se presentaron dos tipos de comportamiento y en cuanto al P, ninguna relación fue encontrada. Sin embargo, Bertsch *et al.* (2006) informaron que no pudo ser obtenida adecuadamente correlación con el rendimiento para el Fe, Mn y Cu, con Mehlich 3.

Henríquez *et al.* (1998) reportan el uso del acomplejante EDTA para la determinación de los microelementos tanto en la solución extractora Olsen Modificado como en la Mehlich 3. No obstante, estos autores afirman que el uso de soluciones básicas como Olsen

Modificado, en suelos ácidos, pueden disolver los fosfatos de Fe y Al, extrayendo formas que en realidad no son disponibles. También comentan que lo contrario ocurre con las soluciones extractoras ácidas como Mehlich 3, que pueden disolver carbonatos y fosfatos de Ca que en realidad no sean disponibles para la planta.

Raij *et al.* (1997) y Burt *et al.* (1998), consideran que para el zinc, cobre, hierro y manganeso, el extractor más adecuado para evaluar la disponibilidad es la solución acomplejante DTPA. Adicionalmente Burt *et al.* (1998) aportan que el análisis de estos microelementos con DTPA es extensivamente usado y específicamente considera las complicaciones asociadas con el alto contenido de cal en los suelos.

3.11 Formas de hierro en el suelo

El hierro es el cuarto elemento en abundancia de la corteza terrestre y el metal más abundante (Fassbender y Bornemisza 1987).

Los totales absolutos de elementos tales como el Si, Fe, Al, Ti, Ca, Mg y algunos otros constituyentes, solo pueden obtenerse por medio de análisis de fusión. Aún cuando esos totales tienen poco significado en lo que se refiere a las necesidades de fertilidad de los suelos, son útiles para caracterizar suelos, arcillas, rocas y minerales (Chapman y Pratt 1973).

La caracterización de los suelos se facilita mediante el conocimiento de las relaciones en que intervienen el silicio, el aluminio, el hierro y el titanio en las fracciones de arcilla, particularmente en los horizontes de un perfil de suelo (Dewis y Freitas 1984).

Los iones de Zn, Mn, y Fe se hallan como elementos integrantes en algunas arcillas silíceas, sobre todo del tipo 2:1. Según las condiciones, estos iones pueden ser liberados de las arcillas o fijados a ellas. Debido a que las cantidades totales de hierro y manganeso en un suelo son suficientemente grandes, la fijación de estos elementos por las arcillas es de poca importancia (Buckman y Brady 1970).

Buckman y Brady (1970) consideran importante estudiar las arcillas con hidróxidos, pues este tipo de material coloidal es frecuentemente dominante en los suelos rojos y amarillos de laterita de los trópicos y subtrópicos.

El hierro también puede encontrarse en forma intercambiable, ligado a grupos terminales del humus (grupos carboxílicos o fenólicos), o ligado a la superficie de las arcillas (Kass 1998).

Por otra parte, Kabata-Pendias y Pendias (1992) y Salomons et al (1995), citados por Peña (2004), mencionan que la concentración total de los metales en un suelo y la explicación de la distribución y las distintas fracciones dependen de las características del suelo, entre las que se debe considerar la textura, el contenido en hidróxidos de Fe y Mn, los minerales de arcilla, el potencial redox, el pH, el complejo de cambio y la materia orgánica y su mineralización. Indica que estos factores serán un buen indicador para comprender la movilidad de los metales en el suelo, la forma en que están distribuidos y su relación con la actividad microbiana del suelo.

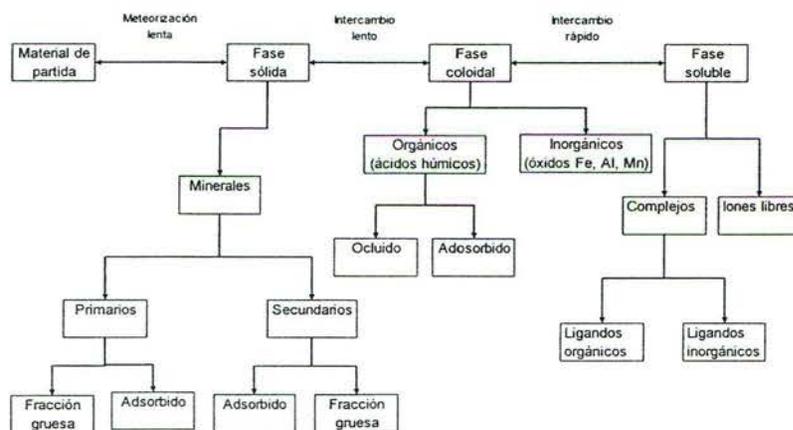


Figura 2. Esquema de distribución de los metales en sus diferentes formas en el suelo (Adaptado de Ross (1994), citado por Peña (2004)).

Para Peña (2004), la información de las formas fisicoquímicas de los metales es requerida para conocer su conducta ambiental (movilidad, disponibilidad, etc.). Los procesos que sufren estos elementos en el suelo marcan sus distintas formas y su conocimiento es de interés para muchas investigaciones referentes a la calidad del suelo, la productividad, el

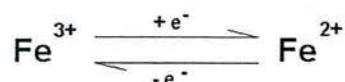
equilibrio medioambiental y la salud humana. Su importancia reside en que cada forma metálica posee distinta movilidad y biodisponibilidad.

Finck (1988) considera que la deficiencia de hierro no se produce generalmente por el empobrecimiento del suelo, sino por la fijación de hierro, aunque éste exista en grandes cantidades (el hierro pertenece a los principales constituyentes de los suelos, con contenidos entre 1 y 4%). Reporta que la deficiencia de hierro es típica de los suelos de las zonas áridas, que tienen un pH alto. Reporta que en estos suelos se producen clorosis férricas, provocadas por la deficiencia de hierro inducida por un exceso de carbonato de calcio. Indica que en suelos calizos de regiones húmedas son raras las carencias agudas de hierro, lo cual indica que en estos suelos las reservas de hierro tienen una mejor movilidad. Este autor considera que la extracción de hierro supone varios kg/ha por año, pero que el cálculo del balance es secundario en los suelos, pues su movilidad es más importante que el contenido de los mismos, desde el punto de vista de su asimilabilidad.

Por otra parte Marschner (1986) indica que muchas veces por condiciones de clima la disponibilidad de nutrientes en la superficie del suelo decrece abruptamente producto de los cambios de estación, debido a que baja el contenido de humedad en el suelo.

En sistemas aireados mantenidos en el rango de pH fisiológico, la concentración de iones de Fe^{3+} y Fe^{2+} están por debajo de 10^{-15} M. Quelatos de Fe^{+++} y ocasionalmente de Fe^{++} son por lo tanto las formas dominantes de hierro soluble en el suelo y en la solución de nutrientes (Marschner 1986). Este autor reporta que el Fe^{+2} es absorbido preferentemente en comparación con el Fe^{+3} , pero esto también depende de la especie de la planta. Reporta que en largas distancias de transporte en el xilema predomina el complejo de Fe^{+3} .

El hierro como elemento de transición es caracterizado por un fácil cambio de su estado de oxidación y por la habilidad de formar complejos de octaedros con varios ligandos.



3.11.1 Hierro total

El análisis químico de la fracción de arcillas muestra que está compuesta principalmente de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , y H_2O con cantidades variables de TiO_2 , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O y P_2O_5 (Baver *et al.* 1973).

Según Fassbender y Bornemisza (1987), las rocas y minerales son una fuente muy importante de los elementos menores catiónicos. Y en el caso específico del hierro su posición de elemento absorbido en pequeñas cantidades, se debe a la muy escasa solubilidad de la gran mayoría de sus compuestos en el estado trivalente, que es el que se presenta en suelos bien aireados. Estos investigadores afirman que el hierro es un componente importante tanto de silicatos primarios como de minerales de arcilla. Sus compuestos principales son óxidos e hidróxidos, frecuentemente hidratados y por lo común, finamente divididos en los suelos, donde tienen un papel decisivo en la coloración de los mismos.

El hierro (Fe) desempeña un papel muy importante en la estructuración del suelo, ya que puede actuar como elemento de unión entre la arcilla y la materia orgánica en la formación de agregados. En las rocas, el Fe se encuentra en forma de Fe^{2+} y en muchas ocasiones como FeS_2 ; tras la oxidación, al entrar en contacto con el aire o por acción de bacterias autótrofas (p. ej. *Thiobacillus ferrooxidans*), el Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} . En suelos menos ácidos, el Fe puede precipitar como carbonatos y así es menos adsorbido (Peña 2004).

Para la determinación de esta forma de hierro en el suelo según Peña (2004) se emplean los tres ácidos inorgánicos. El HNO_3 que destruye la materia orgánica, es un ácido oxidante, el HCL que solubiliza compuestos inorgánicos y el HF que es un ácido débil pero el único que destruye los silicatos. De esta forma el hierro contenido en la fracción de suelo queda contenido en dicha solución en forma total para luego ser determinada su concentración.

3.11.2 Hierro soluble

Para Fassbender y Bornemisza (1987) tanto los procesos redox como los de ácido-base influyen muy fuertemente sobre los niveles solubles de este elemento. Reportan que ensayos bajo un pH controlado la absorción de hierro por un cultivo depende de la concentración de la forma disuelta en el medio.

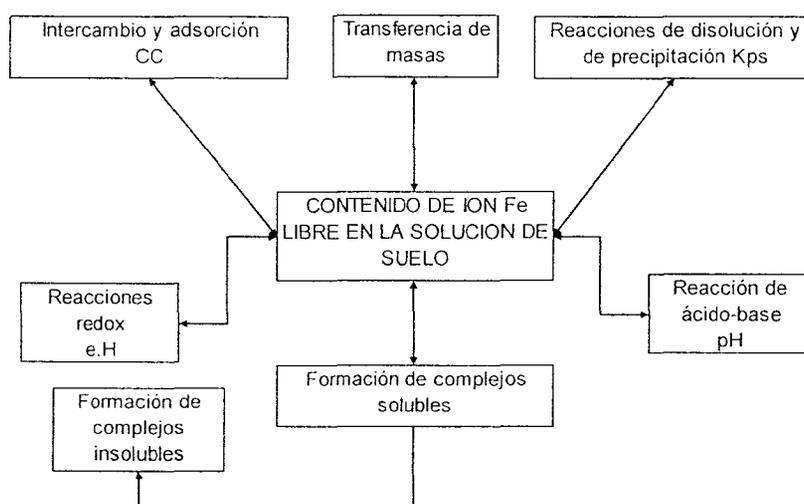


Figura 3. Esquema de procesos que regulan las transformaciones del oligoelemento Fe en los suelos (Adaptado de Fassbender y Bornemisza 1987).

Estos autores consideran que el esquema en la (Fig.3) permite observar, de manera global, las reacciones en la fase líquida, sólida y gaseosa del suelo. Consideran que estas reacciones y sus velocidades y direcciones controlan las concentraciones de los metales en las diversas partes del sistema y, de este modo, el comportamiento del hierro en el suelo.

Para el caso específico de la forma soluble del hierro Peña (2004), indica que su estimación se realiza mediante filtrado de una cantidad conocida de suelo con agua destilada y desionizada, posteriormente se lee en EAA la cantidad de hierro desplazado del suelo y contenida en la solución de agua del filtrado.

3.11.3 Hierro de cambio

Fassbender y Bornemisza (1987) indican que los componentes sólidos, inorgánicos y orgánicos del suelo poseen cargas electrostáticas en su superficie, comentan además que, especialmente en suelos tropicales la fracción de limo puede contribuir, aunque en menor grado, a la capacidad de cambio.

De acuerdo con Peña (2004), para obtener el hierro de cambio, lo que se hace es desplazar los iones del complejo de cambio con una solución saturada de un catión (Acetato de Amonio), tal como se mencionó anteriormente y luego leer la cantidad de hierro que se desplazó mediante filtrado en (EAA) de una cantidad conocida de suelo. Es importante para poder obtener el dato exacto de hierro de cambio, restar la cantidad de hierro soluble que se indicó en el punto anterior.

3.11.4 Hierro asociado a la materia orgánica

Cada uno de los cuatro cationes micronutrientes (Zn, Cu, Mn, Fe) pueden estar contenidos en una combinación orgánica. Los microorganismos también los asimilan a medida que los necesitan para muchas de sus transformaciones microbianas. Los compuestos orgánicos en los cuales estos oligoelementos están combinados varían considerablemente, pero incluyen proteínas, aminoácidos y constituyentes del humus y ácidos tales como cítrico y tartárico. Estos complejos pueden proteger a los micronutrientes de ciertas reacciones peligrosas, tales como la precipitación del hierro por los fosfatos y viceversa. Por otro lado, la formación de complejos puede reducir la asimilación de micronutrientes por debajo del nivel necesario para las necesidades normales de las plantas (Buckman y Brady 1970). Estos autores anotan la importancia de los quelatos como compuestos que protegen los cationes de reacciones inorgánicas en los suelos.

Para estimar la cantidad de hierro asociado a la materia orgánica Peña (2004) reporta el uso de pirofosfato sódico, donde el proceso que se realiza es similar al de hierro de cambio, solo

que en este caso no existe simplemente una atracción iónica, como es lo que sucede con los cationes y la micela coloidal. En el caso de la materia orgánica lo que existe es una atracción química por el ión de hierro, debido a esto se requiere de un compuesto que se acompleje con el Fe^{+2} y Fe^{+3} de forma más fuerte que el de los ácidos orgánicos que lo están acomplejando. Esta es la función del pirofosfato sódico, donde el fosfato se va a ligar al hierro y formar fosfatos de hierro que son compuestos con atracciones más fuertes por el hierro que los que tiene la materia orgánica. Es importante utilizar un pH alto para hidrolizar la materia orgánica y que sea menos quelatante o acomplejante y poder neutralizarla, en este sentido los espacios que deja el hierro al ser extraído serán saturados u ocupados con iones OH^+ y el Na^+ provenientes del pirofosfato sódico. La lectura del hierro se hará del filtrado obtenido de la solución de pirofosfato sódico, en este caso la llama del EAA romperá el enlace del fosfato de hierro y este podrá ser leído. El dato analítico de la forma de hierro asociado a la materia orgánica deberá restársele el dato de la forma extraída con acetato de amonio.

3.11.5 Hierro asociado a óxidos amorfos

Los cambios de un estado de valencia a otro son producidos en muchos casos por microorganismos y materia orgánica. En algunos casos los microorganismos pueden obtener su energía directamente de la reacción inorgánica. Por ejemplo, la oxidación del manganeso bivalente (Mn^{++}) a MnO_2 puede producirse por ciertas bacterias y hongos. En otros casos, los compuestos orgánicos formados por los microbios son responsables de oxidación o reducción. En general, los altos valores del pH favorecen la oxidación, mientras que las condiciones ácidas más frecuentemente a la reducción (Buckman y Brady 1970).

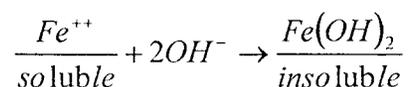
Para obtener la forma de hierro asociada a los óxidos amorfos, Peña (2004) reporta el uso de ácido oxálico-oxalato de amonio, el cual es un compuesto orgánico, que compite con los compuestos de óxidos amorfos por el hierro, hasta quelatarlo. Se requiere de un pH ácido

para disolver los óxidos de forma que durante la reacción cuando se consume el ácido oxálico, el oxalato es la fuente para mantener el buffer de pH ácido, una vez quelatado el hierro en la reacción quedará formando oxalatos de Fe. El uso del oxalato de amonio es importante para limitar el acomplejamiento del hierro asociado a óxidos amorfos, ya que si solo se utiliza el ácido oxálico que a la postre es el que acompleja el hierro, este podría extraer otras formas de hierro, por ejemplo el asociado a las formas cristalinas, perdiéndose de esta forma el objetivo analítico. Por último para obtener el dato de la forma de hierro asociada a los óxidos amorfos se debe restar la forma extraída con pirofosfato sódico.

3.11.6 Hierro asociado a óxidos cristalinos

Los óxidos metálicos (de Fe, Mn, Cu, Zn) se hacen más solubles al bajar el pH (por debajo de 5,0) pudiendo llegar a resultados fitotóxicos (Cadahia 1998).

A medida que el pH va aumentando, las formas iónicas de los cationes micronutrientes son cambiables a hidróxidos u óxidos:



Todos los hidróxidos de los cationes de los oligoelementos son insolubles, algunos no tanto como otros. El pH exacto al cual la precipitación ocurre, varía de un elemento a otro e incluso entre los diferentes estados de oxidación de un mismo elemento. En cualquier caso, el principio es el mismo, ya que generalmente a valores bajos de pH la solubilidad de los cationes micronutrientes llega al máximo y cuando el pH aumenta, su solubilidad y asimilación por las plantas disminuyen (Buckman y Brady 1970). Estos autores consideran evidente la necesidad de mantener un pH intermedio en el suelo, para favorecer la disponibilidad de estos micronutrientes.

El hierro, manganeso y cobre son hallados en suelos en estados de más de una valencia. Los estados de baja valencia vienen favorecidos por condiciones de baja reserva de oxígeno

y nivel relativamente alto de humedad. Ellos son los responsables de los colores del subsuelo, grises y azules, en contraste con los rojos brillantes, marrones y amarillos de los suelos minerales bien drenados (Buckman y Brady 1970).

Según Tisdale y Nelson (1970), cuando el oxígeno es excluido del suelo, como en las inundaciones, los compuestos de hierro férrico serán reducidos a la forma ferrosa. Otros metales reducibles como el manganeso serán reducidos en forma similar. En suelos bien drenados el hierro está normalmente en estado férrico y los compuestos férricos son muy insolubles. Los compuestos ferrosos son mucho más solubles, pero cuando se añaden a suelos bien drenados son oxidados rápidamente al estado férrico.

La interacción de la acidez del suelo y la aireación en la determinación de la asimilación de los micronutrientes es de gran importancia práctica. Los suelos muy ácidos que están pobremente drenados contienen con frecuencia cantidades tóxicas de hierro y manganeso. Esa toxicidad es menos probable en condiciones de buen drenaje. A valores terminales altos en la escala de los pH del suelo, un buen drenaje y aireación pueden tener, a menudo, un efecto opuesto. Los suelos calcáreos, bien oxidados, a veces son deficientes en hierro o manganeso asimilables, aún cuando estén presentes cantidades totales adecuadas de estos elementos traza. Los hidróxidos de las formas de valencia alta de estos elementos son demasiado insolubles para dar lugar a los iones necesarios para el crecimiento de las plantas (Buckman y Brady 1970).

De acuerdo con Peña (2004), para obtener la forma de hierro asociada a óxidos cristalinos se utiliza, ácido oxálico oxalato de amonio más ácido ascórbico, el principio es el mismo indicado en la forma de hierro asociada a óxidos amorfos, pero en este caso el ácido ascórbico acomplejará hierro en forma de ascorbato de hierro por lo que para determinar la cantidad de hierro asociada a la forma de óxido cristalino al final del proceso analítico debe restarse a ésta, la forma extraída con ácido oxálico-oxalato de amonio.

3.11.7 Hierro residual

De acuerdo con Serrano y Adams (2000), esta fracción está formada por minerales primarios y secundarios altamente resistentes, por lo que son considerados desde el punto de vista absorción por las plantas como no asimilables. Esta forma según Peña (2004) corresponde a la forma total de hierro menos la extraída con ácido oxálico oxalato de amonio y ácido ascórbico.

De acuerdo con Fassbender y Bornemisza (1987), en cuanto a los minerales primarios los más comunes son los silicatos y las formas adoptadas por ellos son múltiples. Puede haber sustituciones de silicio tetravalente por aluminio trivalente, lo que permite la entrada de otros cationes en la red para compensar esa deficiencia de carga. Los grupos SiO_4 están a veces enlazados entre sí mediante cationes.

Según estos autores, estas estructuras junto con la composición química, explican porque unos minerales son mucho más alterables que otros, lo cual puede ser la causa de las diferencias en el contenido residual de los elementos de acuerdo a la anterior afirmación de Serrano y Adams (2000).

3.11.8 Hierro biodisponible

De acuerdo con Finck (1988), cuando se evalúa la fertilidad del suelo y la nutrición del cultivo es importante tener en cuenta que las necesidades de hierro se determinan con dificultad mediante el análisis de plantas y no resulta fácil determinar el hierro disponible en el suelo, debido a su elevado contenido total y a las variables condiciones de movilización.

Un elemento biodisponible es aquel que puede ser absorbido por las plantas y tener un efecto sobre los organismos del suelo (Peña 2004). Ross (1994), citado por Peña (2004), comenta que los factores que afectan la movilidad y la disponibilidad de estos elementos en el suelo son, por lo general, el intemperismo o meteorización de la roca madre, la disolución y la solubilidad del metal, la precipitación, la asimilación por las plantas, la inmovilización por

los organismos del suelo, el intercambio catiónico, la adsorción específica, la quimiosorción, la quelatación y lixiviación.

Por otro lado de acuerdo con Kabata-Pendias y Pendias (1992) y Ross (1994), los factores principales que tienen influencia en la solubilidad de los metales son: el pH, la materia orgánica soluble y las condiciones redox, puesto que afecta a los anteriores procesos.

Peña (2004), reporta para la determinación del hierro biodisponible el uso del extractante DTPA, cloruro de calcio y trietanolamina; indica, que el DTPA es un agente quelatante y acomplejante muy fuerte. Por otra parte menciona que por excelencia la función del cloruro de calcio es proveer cargas positivas para mantener el equilibrio químico y facilitar esas reacciones y no permitir que los carbonatos de calcio en suelos alcalinos se disuelvan porque ya existe un exceso de carbonatos de calcio. La función de la trietanolamina es proveer un buffer pH 7.3 donde la quelatación del hierro todavía es posible, no se disuelvan carbonatos de calcio en suelos alcalinos y otra función es que facilita la quema en el EAA para la lectura. En este caso no se debe restar ninguna de las formas de hierro anteriores.

3.12 Indicadores microbiológicos de fertilidad y calidad del suelo

Para Acuña *et al.* (2006), la calidad del suelo no es fácil de conceptualizar. Consideran que se define en función al uso y manejo del medio edáfico que favorece determinadas condiciones (suelos agrícolas, forestales, industriales, etc.). Sin embargo enfatizan en que debe de tomarse en cuenta el equilibrio medioambiental y las funciones básicas del suelo: filtración, productividad y degradación. Desde un punto de vista sostenible y de salud para el agroecosistema, debe definir la capacidad del medio para mantener su productividad biológica, su calidad ambiental, promoviendo además la salud de animales, plantas y hasta del propio ser humano. Así, los parámetros microbiológicos aportan información relativa a la actividad metabólica que se da en el suelo, pues son los que mantienen una mayor sensibilidad frente a procesos no deseables tales como la contaminación o el mal manejo.

Es por ello que los efectos de prácticas agrícolas, así como los producidos por fertilizantes y sistemas de cultivo, pueden ser evaluados a partir de las determinaciones parámetros microbiológicos. Estos investigadores consideran que estos parámetros son apropiados para el estudio de la evolución biológica y el medio ambiente, por lo que se recomiendan como buenos indicadores de la calidad y salud del suelo.

3.12.1 Materia orgánica

De acuerdo con Briceño y Gadea (2002), la materia orgánica del suelo es la fracción donde ocurren los procesos biológicos del suelo, consideran que de su contenido y calidad dependen importantes propiedades físicas y químicas necesarias para soportar la vida de las plantas, la macro y la micro flora del suelo. Indican además que los mecanismos físicos y bioquímicos que median en la conversión de materiales orgánicos exógenos a sustancias orgánicas y su mineralización a especies de los elementos aprovechables por las plantas, son producto de la actividad de los organismos del suelo. Reportan que la descomposición de la materia orgánica en las diferentes capas de suelo, depende de los ingresos (residuos vegetales, organismos en descomposición y fertilizantes) y salidas (a través de la mineralización, lixiviados y cosecha), por otra parte señalan que entre 52 al 98% del carbono orgánico en un amplio rango de suelos está asociado con la fracción de arcilla, óxidos e hidróxidos metálicos, por lo que en adición a la participación de organismos vivos, pueden ocurrir reacciones sin su mediación, consideran que esto ilustra la importancia de los diferentes factores bióticos y abióticos en las reacciones que suceden en el suelo, así como su incidencia en el ambiente físico del mismo.

Por su parte Loynachan (1985) reporta que los microorganismos son degradadores vitalmente importantes para completar el ciclo del carbono, indican que se ha estimado que más de la mitad del carbono en la atmósfera proviene de la actividad microbiana del suelo.

Según García *et al.* (2003), el manejo intensivo del suelo altera considerablemente las propiedades y condiciones ambientales de dicho suelo lo que puede repercutir en la actividad de los microorganismos y por consiguiente en la descomposición de la materia orgánica.

Para Briceño y Gadea (2002), la conservación de la materia orgánica del suelo es la clave para el manejo de un sistema de agricultura sostenible, consideran que para un determinado suelo, el principal responsable de la acumulación de la materia orgánica del suelo es el clima, pero mencionan que también el drenaje y la actividad humana son muy significativos en regiones tropicales.

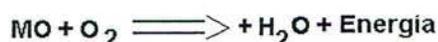
3.12.2 Conteo de poblaciones

Rosales *et al.* (2008), consideran que el recuento de microorganismos puede ser una herramienta importante para comparar sistemas de manejo agrícola, la aplicación de enmiendas o el uso de plaguicidas. Estos investigadores afirman que el conteo de poblaciones permite determinar la presencia de grupos funcionales de microorganismos que proporcionan información importante del sistema bajo estudio y que pueden ser utilizados como indicadores de manejo (por ejemplo; presencia de patógenos, fijadores de nitrógeno, etc.), adicionalmente consideran que otra ventaja que presenta su uso es que los aislamientos bacterianos pueden conservarse en el laboratorio, identificarse y utilizarse para otros estudios y que además permite, si se utilizan medios de cultivo adecuados, el seguimiento de microorganismos introducidos al ambiente (bio-fertilizantes, agentes de control biológico, otros). Algunos de los grupos funcionales utilizados en este tipo de análisis según estos autores son; (a) Bacterias aerobias, las cuales participan en los procesos de descomposición de residuos, formación de agregados, interacciones con plantas y otros microorganismos, comenta que si bien la mayoría son aerobias, algunas toleran condiciones de poca disponibilidad de oxígeno, (b) Hongos; estos se encuentran principalmente en

suelos bien aireados, algunos son patógenos de plantas, otros son importantes por degradar compuestos orgánicos como celulosa, lignina y pectina, favorecen la estructura del suelo al unir las partículas para formar agregados estables y pueden tolerar pH ácidos.

3.12.3 Respiración microbiana

Según García *et al.* (2003), la respiración del suelo es un proceso que refleja la actividad biológica del mismo y que se pone de manifiesto a través del desprendimiento de CO₂ o el consumo de O₂ resultante del metabolismo de los organismos vivos existentes en el suelo. Reportan que todos los microorganismos heterótrofos tienen la propiedad de degradar la materia orgánica, obteniendo la energía que necesitan para su desarrollo a través de la descomposición de compuestos orgánicos tales como celulosa, proteínas, nucleótidos y compuestos humificados. En estas reacciones redox de oxidación de la materia orgánica por los microorganismos (respiración microbiana), el oxígeno funciona como un aceptor final de electrones obteniéndose como producto final del proceso CO₂ y agua. La reacción general de descomposición de la materia orgánica por los microorganismos heterótrofos es:



Rosales *et al.* (2008), consideran que debido al papel de los microorganismos en la descomposición de residuos, la medida de la actividad biológica puede ser un indicador valioso del efecto del manejo del sistema sobre la población microbiana del suelo. Reportan que algunas de las técnicas utilizadas reflejan la actividad de individuos o grupos de organismos específicos, mientras que otras se refieren a la actividad total de la biota del suelo. Entre las primeras técnicas mencionan la medición en el suelo de diferentes enzimas como la catalasa, hidrolasa, proteasa y ureasa, pero reportan que la actividad total de la población microbiana del suelo puede determinarse también mediante la técnica de respiración, que refleja la actividad biológica de la microbiota del suelo.

Por su parte García *et al.* (2003), consideran que se puede afirmar entonces que el estudio de la calidad biológica y bioquímica de un suelo puede servir como indicador del estado general de dicho suelo, sin embargo indican que este tipo de medidas no resulta sencillo debido a lo complicado que es el estudio de los microorganismos y de sus reacciones al nivel de microhábitats, pero está claro que son necesarios parámetros de actividad microbiana que ayudan a conseguir este conocimiento y la respiración de los microorganismos del suelo es sin duda uno de ellos.

Para Acuña *et al.* (2006) a pesar de las limitaciones de que tiene la estimación de la respiración microbiana, ésta continúa siendo el método más popular que se usa como indicador de la actividad microbiana y de la descomposición de sustratos específicos del suelo. Consideran que estos parámetros indican de manera fehaciente la mineralización que ocurre en el sustrato orgánico del suelo y son indicadores de la calidad de la materia orgánica y salud del suelo.

La mineralización aplicada al carbono puede estar definida como el consumo de O₂ o la liberación de CO₂ mediante la actividad de microorganismos del suelo que son metabólicamente activos, (Anderson 1985).

La actividad del suelo (respiración) es comúnmente medida por la tasa de evolución de CO₂ proveniente del suelo. El flujo de CO₂ teóricamente representa una medición integrada de la respiración de raíces, respiración de la fauna del suelo, y la mineralización del carbono desde los diferentes fracciones del carbono del suelo y del mantillo. Las mediciones también proveen una indicación sensitiva de la respuesta de la actividad microbiana a variaciones de temperatura y humedad, los efectos de humedecimiento - secado y el manejo del medio. El método que se utiliza es el de incubación estática, donde se incuba a 25 °C durante 10 días una muestra de suelo junto a un vial que contiene una trampa o solución alcalina y cerrado

herméticamente, de tal manera que el CO_2 que se genere se pueda recoger en la solución alcalina y se cuantifica titulando con un ácido.

A pesar de sus limitaciones, la respiración continúa siendo el método más popular que se usa como indicador de la actividad microbiana y de la descomposición de sustratos específicos del suelo (Peña 2004).

3.12.4 Actividad catalasa

La catalasa es una enzima intracelular que se encuentra en todas las bacterias aerobias y en la mayoría de las anaerobias facultativas, estando ausente en las anaerobias obligadas (García *et al.* 2003), por ello, según estos autores la enzima se ha considerado a lo largo de los años como un exponente de la actividad microbiana del suelo y se ha relacionado con el estado de fertilidad edáfico. Sin embargo mencionan que se ha señalado que esta actividad no muestra una buena correlación con el número total de microorganismos del suelo, por lo que su papel como exponente del estado bioquímico del mismo sería limitado.

La catalasa es la enzima encargada de catalizar la reacción que descompone el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) liberando H_2O y O_2 . Tiene una función detoxificante en las células ya que elimina el H_2O_2 , altamente tóxico que se forma durante la cadena de transporte de electrones en la respiración aerobia y en diversas reacciones de hidroxilación y oxigenación, de acuerdo con García *et al.* (2003). Además fue la primera enzima determinada en el suelo y prácticamente la única que se estudió durante los primeros años del siglo XX. Estos investigadores consideran que uno de los problemas de las determinaciones de la actividad catalasa en el suelo, siempre que se haga a través de la descomposición del H_2O_2 , es que entre 5 y 65% de la actividad total que se determina puede ser debida a catálisis no enzimática (por enmascaramiento de los resultados de la óxido-reductasa), atribuible a compuestos inorgánicos de Fe y Mn.

Por lo anterior García *et al.* (2003), consideran que la catálisis no enzimática de la descomposición del H_2O_2 , en el suelo podría llevar a confusión y hacer que se considere como debida a la actividad de la enzima catalasa algo que no lo es; consideran que esto explicaría la aparente contradicción entre el hecho de que la catalasa sea una enzima intracelular y el que pocos años atrás se haya indicado que es una enzima muy estable en el suelo y que incluso, puede existir como una enzima extracelular en el mismo.

3.12.5 Índice de mineralización

En general, la materia orgánica del suelo está formada por un sustrato recalcitrante o no mineralizable y por otro lábil y fácilmente mineralizable. La biomasa microbiana es el componente más activo del suelo, forma parte del "pool" de la materia orgánica y cumple una función muy importante en el humus, ya que interviene en los procesos de mineralización de nutrientes; por ello, algunos autores afirman que puede ser empleada como índice de comparación entre sistemas naturales o como indicador de las variaciones sufridas en el equilibrio de un suelo debido a la presencia de agentes nocivos (Powlson *et al.* 1987; Blum 1993; Doran *et al.* 1994).

El carbono mineralizable (C lábil asociado a la biomasa microbiana) más el carbono lábil no mineralizable (proveniente de rastrojos, hojarascas, etc.), aproximadamente representa el 3 % de la materia orgánica total. Esta fracción lábil de la materia orgánica está constituida por hongos, bacterias, actinomicetos, inclusive virus y otros microorganismos que ejercen una función en la degradación de la misma. La contribución relativa de cada grupo microbiano a la biomasa total del suelo es muy variable; fundamentalmente depende del tipo de suelo y, dentro de un mismo suelo, de factores ambientales (Ross *et al.* 1984). Por ejemplo, algunos autores consideran que los hongos representan más del 60 % de la biomasa microbiana del suelo (Anderson y Domsch, 1975; Lynch, 1983; Nannipieri *et al.* 1978), otros afirman que éstos no supera el 27 % de la misma (Russell, 1973; Richards, 1987) y algunos atribuyen el

mayor porcentaje de biomasa a la suma de bacterias y actinomicetos (Berkeley, 1971; Rusell, 1973). Cabe señalar que en la biomasa edáfica, las bacterias son los microorganismos que realizan mayor actividad; de hecho en estudios de microscopía de la población microbiana de suelos fértiles se han encontrado más de 2500 millones de bacterias por gramo, de las cuales la mayor parte son bacterias metabolizadoras de urea, proteínas y pectinas (Pelczar *et al.* 1981).

Por otro lado, existen factores bióticos y abióticos que ejercen su acción sobre la población microbiana del suelo y que establecen, por lo tanto, la densidad y distribución de los componentes de la biomasa edáfica. Así mismo, estos factores pueden afectar la mineralización del medio y por lo tanto en el C lábil. Los más importantes son: humedad, temperatura, luz, aireación, pH, fracción mineral, profundidad del suelo, materia orgánica, vegetación y relaciones intra e íter específicas con otros organismos del suelo (Brookes 1985; Pankhurst 1997; Tate 2000; Peña 2004).

Por otra parte, según el tipo de microorganismo predominante en el suelo así se verá beneficiado el reciclaje de carbono, por lo que habrá mayor o menor cantidad de la fracción lábil de la materia orgánica, es decir un material más humificado, es más fácilmente mineralizable.

Los microorganismos del suelo juegan un doble papel en la disponibilidad de nutrientes, ya que por un lado intervienen en los procesos de mineralización y una vez muertos ponen a disposición de otros microorganismos y de las plantas los nutrientes contenidos en los restos microbianos (Jenkinson y Ladd 1981) y por otro lado, también participan en la inmovilización.

Acuña *et al.* (2006) encontraron en estudios de calidad de suelos en la zona Atlántica de Costa Rica bajo el cultivo de banano una relación significativa, entre la materia orgánica y el índice de mineralización. Estos autores concluyen para las condiciones evaluadas que al

aumentar la cantidad de materia orgánica en los suelos la mineralización de la misma disminuye. Consideran que eso explica la acumulación de la materia orgánica en los suelos, por lo que se puede inferir que el sustrato orgánico es más recalcitrante, provocando que la mineralización sea menor y, aunado a la tendencia ácida de los suelos estudiados y la exudación o presencia de sustancias agresivas de la rizosfera, hay menos cantidad de biomasa microbiana activa y baja actividad bioquímica y biológica.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización

La investigación se realizó en tres fincas bajo el cultivo de piña, localizadas en San Carlos y Sarapiquí, Costa Rica; ubicadas geográficamente en la vertiente Caribe y con características bajas, medias y altas en términos de hierro extraído con Mehlich 3. Dichos lugares son propiedad de la empresa Banacol de Costa Rica, conocidas como Finca Industria Cartonera Inca, Finca Frutas Tropicales Venecia y Finca Agrícola Industrial San Cayetano, respectivamente.

A pesar de ubicarse las tres fincas en la vertiente del Caribe, poseen condiciones climáticas diferentes dadas las diferencias en la altitud.

4.1.1 Finca Industria Cartonera Inca

Se encuentra ubicada en la hoja cartográfica Río Tres Amigos. El área productiva se encuentra en el distrito de Aguas Zarcas, cantón de San Carlos, provincia de Alajuela, ubicada a 100 msnm; su ubicación geográfica se encuentran entre 10° 24' latitud norte y 84° 20' longitud oeste, entre Quebrada Los Chiles, Río Tres Amigos y Vuelta Jícaro. Presenta una temperatura promedio de 25,5 °C; y una precipitación de 3603 mm durante el período de la investigación (Estación meteorológica de Industria Cartonera Inca).

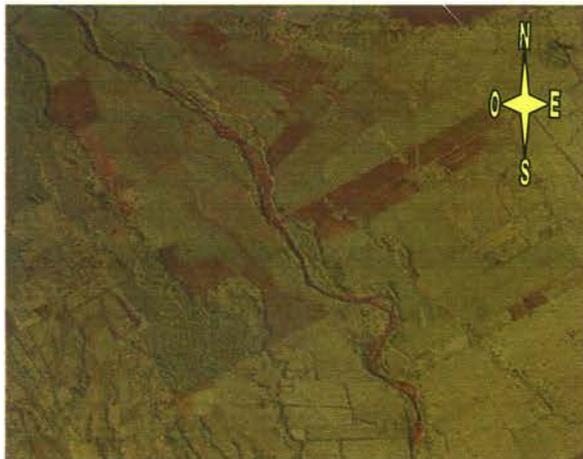


Figura 4. Fotografía Finca Industria Cartonera Inca.
Fuente: CENAT-PRIAS. Misión Carta 2005. Imagen
Fotográfica Falso Color Natural.

El suelo donde se ubicaron las unidades experimentales pertenece al orden ultisol y es de textura arcillosa.

Climatología

Finca Industria Cartonera Inca durante la investigación presentó una precipitación y temperatura intermedia con respecto a las otras fincas, los datos de temperatura y precipitación durante el período de la investigación se observa en la (Fig. 5).

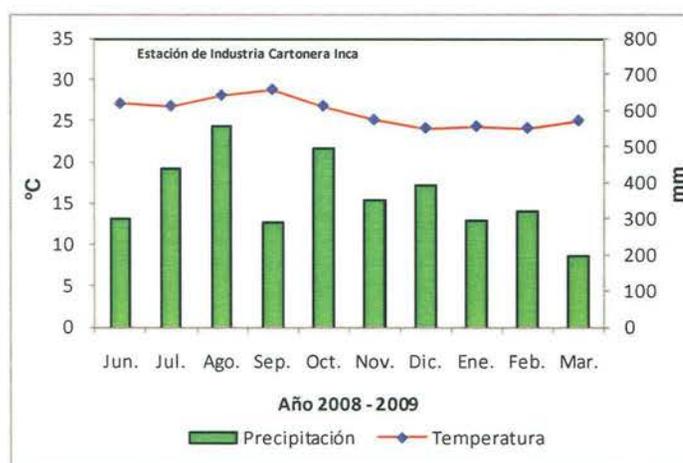


Figura 5. Temperatura y precipitación de Finca Industria Cartonera Inca, durante el período de la investigación.

Esta finca como se nota en la fotografía de falso color natural de la (Fig. 4), presenta una influencia montañosa intermedia con respecto a la de las otras fincas, esto posiblemente explica el comportamiento de la precipitación y la temperatura. Situación similar se presenta con la luminosidad y la radiación solar (Fig. 6).

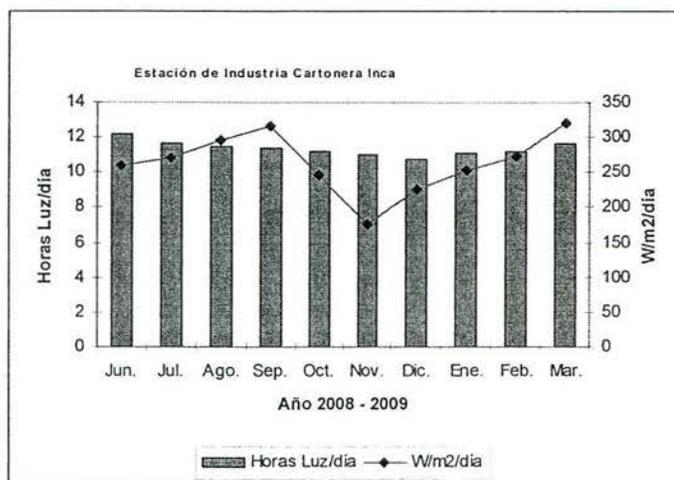


Figura 6. Horas Luz/día y radiación solar ($W/m^2/día$) de Finca Industria Cartonera Inca, durante el período de la investigación.

Geología

De acuerdo con los segmentos morfotectónicos definidos por Mora (1981) citado por Cortés (1993); Finca Industria Cartonera Inca se encuentra en el segmento Puntarenas, donde se presenta una Zona de Benioff activa hasta los 140 km de profundidad con un buzamiento de 30 grados, situación que en apariencia para este autor no favorece las condiciones para generar vulcanismo en la actualidad. En cuanto a la unidad de relieve de acuerdo a las distinciones realizadas por Mora (1981), la finca se ubica en el Arco Interno 3 (Plutónico-volcánico) específicamente en la definida por la Cordillera Volcánica Central. Esta constituye el límite norte de la Depresión Tectónica Central, donde sus materiales de origen volcánico (lavas, ignimbritas, tobas y lahares), son de composición intermedia a básica, provenientes de los focos volcánicos alineados desde el grupo Platanar-Palmira (2183 m) hasta el volcán Turrialba (3339 m), pasando por el Poás (2704 m), Barba (2800 m), Congo (1746 m) e Irazú

(3453 m), individualizados y separados por pasos o pequeñas depresiones por donde soplan y se intercambian las masas de aire entre el Caribe y Pacífico. De acuerdo a Cortés (1993), las características del modelado de la Cordillera Volcánica Central muestran con claridad las diferencias impuestas por la diferenciación climática. Vertientes más tendidas y valles menos abruptos hacia el Pacífico, con acumulaciones más estables de materiales finos que han dado origen a suelos de altos rendimientos agrícolas, mientras que la Vertiente Caribe (a la que pertenece Finca Industria Cartonera Inca y Frutas Tropicales Venecia) presenta laderas y valles abruptos y profundos, donde los cursos fluviales tienen un recorrido de llanura más o menos larga con alta probabilidad de experimentar inundaciones periódicas.

Por su parte Sprechmann (1984) señala que el norte de Costa Rica ha sido poco estudiado desde el punto de vista estratigráfico y menciona que los estudios bioestratigráficos más precisos sobre la región Norte de Costa Rica, fueron efectuados por una compañía petrolífera, pero son inéditos.

Con base en el mapa generalizado de unidades geológicas presentadas por Tournon y Alvarado (1997) citados por Denyer y Kussmaul (2000), esta finca se ubica en la unidad geológica Sedimentos del Cuaternario. En cuanto a su mineralogía se infiere de este autor el origen laterítico del suelo y contenidos de bauxita.

En cuanto a la estratigrafía sedimentaria Denyer y Kussmaul (2000), ubican a finca Industria Cartonera Inca en la cuenca sedimentaria de San Carlos y en lo que respecta a la estratigrafía de las rocas ígneas sobresale en la vertiente caribeña específicamente la de conos piroclásticos de Aguas Zarcas, que están compuestos principalmente por cenizas, lapilli y bombas, generalmente de color rojo- marrón, con fenocristales de olivino, augita y plagioclasa.

Ubicada Industria Cartonera Inca en el mapa geológico de MINAE (1982), se interpreta que su formación es de lahares finos sin diferenciar.

Geomorfología

De acuerdo a la propuesta de mapa geomorfológico expuesto por Denyer y Kussmaul (2000) y SEPSA (1980a), finca Industria Cartonera Inca pertenece a las formas de origen aluvial específicamente de las áreas de llanuras y planos aluviales y valles, que considerando la topografía de la finca y las áreas circundantes, la descripción es más consecuente con las *llanuras aluviales*, las cuales son grandes extensiones de terrenos depositados por varios ríos. En cuanto al tipo de relieve la propuesta del mapa de Flores (2005), ubica a esta finca en llanuras bajas y planicies suavemente inclinadas en partes onduladas, que de acuerdo con Vargas (2006) encontraron su máxima formación en el Holoceno, al reducirse la actividad volcánica y al aumentar la actividad lluviosa, lo que provocó una erosión acelerada y el posterior transporte y deposición de grandes flujos de materiales sedimentarios al pie de las cordilleras.

En concordancia con SEPSA (1980a), finca Industria Cartonera Inca se encuentra influenciada por las unidades geomorfológicas de "conos piroclásticos de Aguas Zarcas" caracterizados por el tipo de roca formadora que es el lapilli de composición andesítica; "llanuras altas viejas en proceso de erosión", los caracteriza pequeños causes de laderas de pendiente suave. La diferencia de altura entre el nivel del río y la parte más alta del terreno no pasa de 20 metros.

Zona de Vida

De acuerdo al Mapa de Zonas de Vida presentada por Bolaños y Watson (1993), Industria Cartonera Inca se encuentra en bh-T (Bosque Húmedo Tropical). Bolaños y Watson (1993) señalan que el bh-T tiene un rango de precipitación entre los 1950 y 3000 mm anuales. La

biotemperatura media anual oscila entre 24 y 25°C, mientras que la temperatura varía entre 24 y 27°C como promedio anual.

4.1.2 Finca Agrícola Industrial San Cayetano

Se encuentra ubicada en la hoja cartográfica Río Sucio. El área productiva se encuentra en el distrito de Horquetas, cantón de Sarapiquí, provincia de Heredia, ubicada a 60 msnm; su ubicación geográfica se encuentran entre 10° 24' latitud norte y 84° 53' longitud oeste, entre Colonia Gonzáles Flores, Río Sucio y el cause seco del río Chirripó, presenta una temperatura promedio de 26 °C; y una precipitación de 2768 mm durante el período de la investigación (Estación meteorológica de Agrícola Industrial San Cayetano).

El suelo donde se ubicaron las unidades experimentales pertenece al orden entisol y es de textura franco arenosa.



Figura 7. Fotografía Finca Agrícola Industrial San Cayetano. Fuente: CENAT-PRIAS. Misión Carta 2005. Imagen Fotográfica Falso Color Natural.

Climatología

De las tres fincas donde se desarrolló la investigación, Agrícola Industrial San Cayetano es la finca más baja en altitud y la que presenta la menor influencia montañosa en áreas circundantes como se observa en la fotografía de la finca en la (Fig. 7).

Finca Agrícola Industrial San Cayetano durante la investigación presentó la menor precipitación y la mayor temperatura promedio de las otras fincas donde se desarrolló la investigación. Los datos de esta finca se observan en la (Fig. 8).

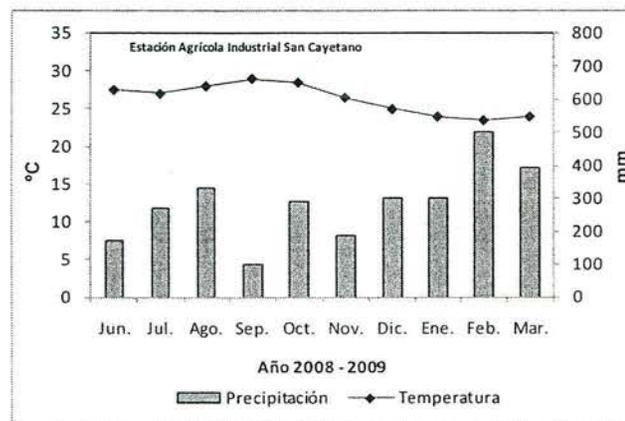


Figura 8. Temperatura y precipitación de Finca Agrícola Industrial San Cayetano, durante el periodo de la investigación.

Para la empresa Banacol esta es la finca con la mayor luminosidad y radiación solar de las tres, y aunque esta diferencia solo se nota ligeramente en los meses de noviembre y diciembre de acuerdo a las Figuras 6, 9 y 12 (posiblemente por la ubicación "sesgada" que deben tener las estaciones meteorológicas por razones de seguridad), la realidad práctica es que los problemas fisiológicos de quema sol en fruta en esta finca son mayores en comparación con las otras fincas¹. Explicando también el comportamiento de la temperatura y la precipitación en comparación con las otras dos fincas.

¹ Estadísticas históricas de producción y rechazo, división piña Banacol de Costa Rica.

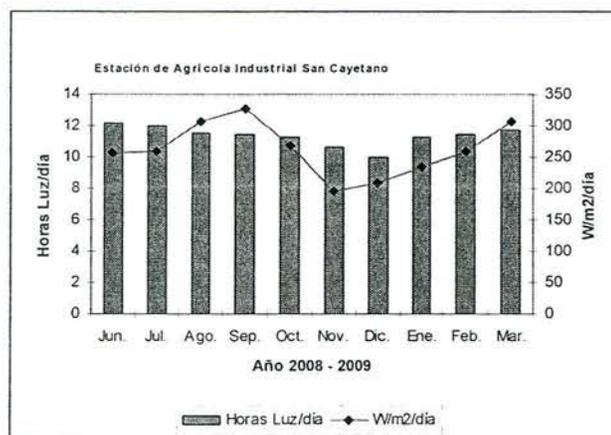


Figura 9. Horas Luz/día y radiación solar (W/m²/día) de Finca Agrícola Industrial San Cayetano, durante el período de la investigación.

Geología

De acuerdo con los segmentos morfotectónicos definidos por Mora (1981) citado por Cortés (1993); Finca Agrícola Industrial San Cayetano se encuentra en el segmento Parrita, que presenta una actividad en su Zona de Bennioff entre 180 y 200 Km de profundidad y un buzamiento de 40 grados, justificándose para este autor la existencia de condiciones óptimas para que se desarrolle actividad volcánica. En cuanto a la unidad de relieve, la finca se ubica en el área tras-arco interno que comprende toda el área posterior al arco interno, incluyendo las llanuras de Guatuso, Santa Clara, Sarapiquí, Tortuguero y Limón, compuestas de sedimentos clásicos marinos y continentales del Terciario y Cuaternario. Considera que otra característica notable en esta unidad es la determinación de varios niveles de terrazas, lo que demuestra la trasgresión y regresión del nivel de las aguas marinas experimentado en el Cuaternario (última glaciación).

En el mapa generalizado de unidades geológicas presentado por Tournon y Alvarado (1997) y citado por Denyer y Kussmaul (2000), Agrícola Industrial San Cayetano, se ubica en la unidad geológica Sedimentos del Cuaternario. En cuanto a su mineralogía se infiere de este autor que existe presencia de laterita.

En cuanto a la estratigrafía sedimentaria Denyer y Kussmaul (2000). Ubican a Agrícola Industrial San Cayetano en la cuenca sedimentaria de Limón. Por otra parte ubicada Agrícola Industrial San Cayetano en el mapa geológico de MINAE (1982), se interpreta que su formación es de lahares finos sin diferenciar.

Geomorfología

De acuerdo a la propuesta de mapa geomorfológico expuesto por Denyer y Kussmaul (2000) y SEPSA (1980b), finca Agrícola Industrial San Cayetano pertenece a las formas de origen aluvial específicamente de las áreas de pantanos y marismas. Considerando la topografía de la finca y las áreas circundantes, la descripción es más consecuente con la de *pantanos*, las cuales corresponden a rellenos originados por aportes fluviales dentro de llanuras aluviales. Son zonas de terreno plano o ligeramente cóncavo, suelen tener un microrelieve de pequeñas ondulaciones, en general son áreas localizadas a baja altura, están formadas por un relleno de fragmentos líticos muy finos, con dominancia de arcilla, limo y pequeños lentes arenosos. Su edad es del Pleistoceno a Reciente.

En concordancia con SEPSA (1980b), finca Agrícola Industrial San Cayetano se encuentra influenciada por la unidad geomorfológica del “abanico aluvial del río Chirripó-Sucio” se localiza al norte del país, su pendiente es de 1° a 2° (1% a 3%). Su superficie plana, excepto donde es cortada por los ríos. Sus laderas son casi verticales. Los espacios interfluviales son amplios, más de 200 m. El tipo de roca es producto de lahares y corrientes de lodo. Aunque pueden observarse bloques de lava andesítica dentro de una matriz arcillosa. En su formación, han tomado parte, los ríos Puerto Viejo, Sucio, Chirripó, Corinto y las quebradas del área. Hacia el este se une con el abanico del río Toro Amarillo, su edad es del Pleistoceno al Actual.

Zona de Vida

De acuerdo al Mapa de Zonas de Vida presentada por Bolaños y Watson (1993), Agrícola Industrial San Cayetano se encuentra en bmh-T (Bosque muy húmedo Tropical), para fines de uso de la tierra, este bioclima presenta algunas limitaciones, debido al exceso de precipitación que ocurre durante la mayor parte del año; por ende, los terrenos bajo esta condición ecológica son muy susceptibles a la erosión. Sin embargo consideran que para fines de producción de biomasa son muy productivos; de este modo, resultan muy atractivos para actividades forestales, aparte de que su condición natural inalterada presentan una gran diversidad. Los bosques tropicales más exuberantes y los más altos se desarrollan en este bioclima.

Bolaños y Watson (1993), indican que el rango de precipitación pluvial oscila entre 4000 y 6000 mm, como promedio anual. La biotemperatura media anual varía entre 24 y 25°C, con una temperatura media de 24 a 27°C. En su transición Premontano (bmh-T▲) el rango de precipitación es de 4000 a 5500 mm, y con un ámbito de temperatura y biotemperatura equivalentes de 21.5 a 24°C. El período efectivamente seco puede variar entre 0 y 3.5 meses.

4.1.3 Finca Frutas Tropicales Venecia

Se encuentra ubicada en la hoja cartográfica Aguas Zarcas. El área productiva se encuentra en el distrito de Venecia, cantón de San Carlos, provincia de Alajuela, ubicada a 300 msnm; a 10° 24' latitud norte y 84° 16' longitud oeste, sus localización está entre Río Guayabo y Río Toro, con una temperatura promedio de 23 °C; y una precipitación de 5151 mm durante el período de la investigación (Estación meteorológica de Frutas Tropicales Venecia).

El suelo donde se ubicaron las unidades experimentales pertenece al orden inceptisol y es de textura franco arcillo arenoso.

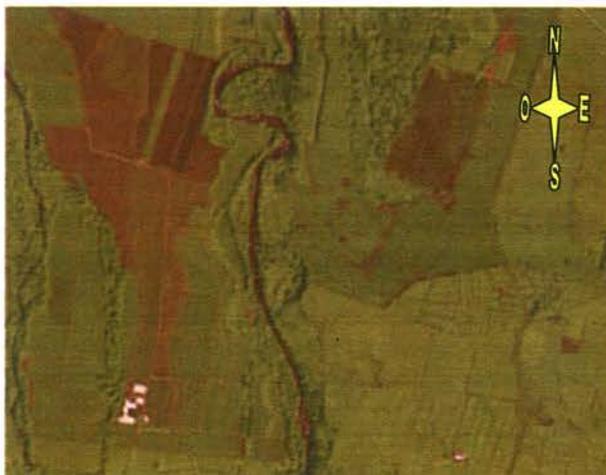


Figura 10. Fotografía Finca Frutas Tropicales Venecia. Fuente: CENAT-PRIAS. Misión Carta 2005. Imagen Fotográfica Falso Color Natural.

Climatología

Finca Frutas Tropicales Venecia presentó la mayor precipitación de las tres fincas durante la investigación, así como la menor temperatura promedio (Fig. 11), lo anterior posiblemente se debe a la influencia de los ríos Guayabo y río Toro que rodean la finca y cada uno con su respectiva área de amortiguamiento (montaña) en la periferia de su cause (Fig. 10), condiciones que le confieren un microclima muy particular de temperaturas más bajas.

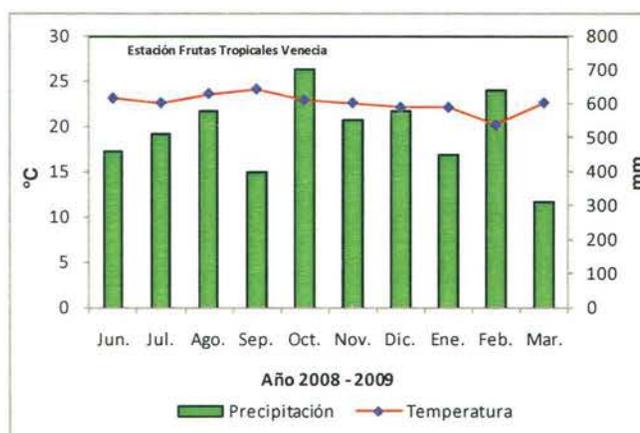


Figura 11. Temperatura y precipitación de Finca Frutas Tropicales Venecia, durante el período de la investigación.

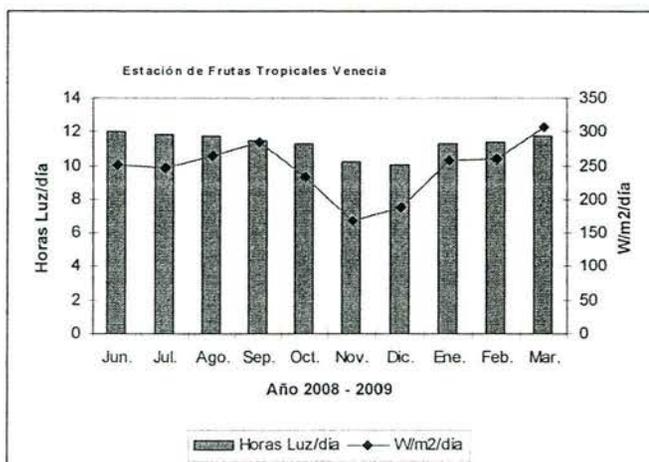


Figura 12. Horas Luz/día y radiación solar ($W/m^2/día$) de Finca Frutas Tropicales Venecia, durante el período de la investigación.

Geología

De acuerdo con los segmentos morfotectónicos definidos por Mora (1981) citado por Cortés (1993), Finca Frutas Tropicales Venecia se encuentra en el mismo segmento que Industria Cartonera Inca, es decir el segmento Puntarenas, así como en la misma unidad de relieve. Por consiguiente existe la misma condición en cuanto a su estratigrafía, según Sprechmann (1984).

Con base en el mapa generalizado de unidades geológicas presentadas por Tournon y Alvarado (1997) citados por Denyer y Kusssmaul (2000), esta finca se ubica en la unidad geológica Rocas Volcánicas del Cuaternario. En cuanto a su mineralogía se infiere de este autor la misma descrita para Industria Cartonera Inca, es decir, origen laterítico del suelo y contenidos de bauxita.

En cuanto a la estratigrafía sedimentaria Denyer y Kusssmaul (2000), ubican a finca Frutas Tropicales Venecia en el límite de la cuenca sedimentaria de San Carlos y el Arco Magmático, en lo que respecta a la estratigrafía de las rocas ígneas la descripción más apropiada con las características actuales de la finca al igual que Industria Cartonera Inca es en la vertiente caribeña específicamente la de conos piroclásticos de Aguas Zarcas.

Ubicada Frutas Tropicales Venecia en el mapa geológico de MINAE (1982), se interpreta que su formación es de lahares finos sin diferenciar.

Geomorfología

De acuerdo a la propuesta de mapa geomorfológico expuesto por Denyer y Kussmaul (2000) y SEPSA (1980c), finca Frutas Tropicales Venecia pertenece a las formas de origen volcánico específicamente de la Cordillera Central, donde los macizos volcánicos se extienden desde el piso del valle Central hasta las llanuras del Caribe y del norte, los tipos de rocas predominantes en esta unidad son lavas, piroclastos y lahares. En cuanto al tipo de relieve la propuesta del mapa de Flores (2005), ubica a esta finca en faldas de cordillera con inclinación uniforme y dirección frecuente.

En concordancia con SEPSA (1980c), finca Frutas Tropicales Venecia se encuentra influenciada por la unidad geomorfológica del “abanico aluvial de los ríos Cuarto y Sarapiquí” se localiza al norte del país, cubriendo varias poblaciones del área entre ellas, La Virgen, San Miguel y Río Cuarto, los fragmentos que constituyen este relleno son de rocas volcánicas. Dentro de ellos se encuentran pedazos de rocas andesíticas, basálticas y de tobas. La mayor parte se encuentran bien conservados aunque en algunos sitios hay materiales muy meteorizados evidenciando coladas de lodo en diferentes épocas y distinto grado de meteorización. La unidad es un relleno de coladas de lodo bajadas principalmente de la falda norte del macizo del volcán Poás. Los ríos Toro, Cuarto y Sarapiquí han contribuido con ese relleno, hoy día el Toro y el Sarapiquí está a varias decenas de metros bajo el nivel del abanico. Proviendo de unidades del Plio-Pleistoceno, este relleno es de fines del Pleistoceno a más reciente.

Zona de Vida

De acuerdo al Mapa de Zonas de Vida presentada por Bolaños y Watson (1993), Frutas Tropicales Venecia se encuentra en bmh-P (Bosque muy húmedo Premontano), estos autores consideran que esta es una condición favorable, pero no óptima, para el desarrollo de actividades de uso del suelo, debido a la abundante, aunque no excesiva, cantidad de precipitación. Los cultivos de tipo permanente y los pastos según estos investigadores son las actividades que mejor se adaptan a este bioclima.

Bolaños y Watson (1993), indican que esta Zona de Vida posee un rango de precipitación bastante amplio: entre 2000 y 4000 mm como promedio anual. Su rango de biotemperatura, el cual es similar al rango de temperatura, varía entre 17° y 24°C.

4.2 Descripción de los tratamientos

Los tratamientos se aplicaron a tres fincas con contenidos de hierro biodisponible bajo, medio y alto, de la siguiente forma:

Tratamiento 1: testigo absoluto, sin aplicación de hierro.

Tratamiento 2: 13,34 kg de hierro ha⁻¹.

Tratamiento 3. 6,67 kg de hierro ha⁻¹.

El hierro utilizado corresponde a una fuente comercial sulfatada, heptahidratada y con 20% de hierro.

4.3 Descripción de las parcelas experimentales

Posterior a la ubicación de áreas objetivo mediante el Kriging realizado con Surfer v7.0, se revisaron lotes disponibles para el ensayo, de acuerdo al programa de preparación de suelos y siembra de cada finca. De esta forma en cada unidad experimental, al inicio de la aplicación de los tratamientos, antes de la primera fertilización al suelo, según el manejo convencional del cultivo en esta empresa, se tomó una muestra de suelo a la cual se evaluó

el hierro biodisponible extraído con (DTPA) y en una proporción 1:2 (Peña 2004), para garantizar que las áreas seleccionadas tuvieran los contenidos relativos bajos, medios y altos de hierro en las diferentes parcelas experimentales de cada finca.

El trabajo de campo así como cada uno de los análisis empleados se desarrolló sobre 12 parcelas experimentales en cada orden de suelo (finca), correspondientes a 4 repeticiones para cada uno de los tres tratamientos, para un total de 36 parcelas experimentales, del mismo material de siembra (tipo y peso),

El área total de la investigación fue de 8,12 hectáreas netas de cultivo, con densidad de siembra de 65.075 plantas por hectárea. Cada parcela experimental constó de 2250 m², correspondientes a 14680 plantas distribuidas en 33 camas de siembra de 30 metros de longitud a doble hilera, de acuerdo al manejo convencional del cultivo.

Los muestreos se realizaron dejando 2 camas laterales y 4 metros en los extremos longitudinales como efecto de bordes. De esta forma, los diferentes tipos de muestras se tomaron sobre un total de 28 camas mediante 2 trazos diagonales vértice a vértice.

4.4 Aplicación de los tratamientos

La aplicación de los tratamientos se realizó con la aspersión foliar de sales fertilizantes que se realizan de forma convencional en las fincas seleccionadas. Estas se realizaron cada 20 días, iniciando a los 30 días después de la siembra y finalizando 7 días antes de la inducción de la floración, de modo que el total de aspersiones con hierro fueron ocho, para cubrir la dosis originalmente propuesta.

Se utilizó un spray boom de la marca Farmco con dos brazos pulverizadores de 16.5 mts de longitud cada uno, suficiente para cubrir el ancho del diseño de siembra. Las boquillas utilizadas fueron de la marca Teejet (disco 4 y núcleo 35) ambos cerámicos, la presión de la aspersión fue 30 psi, para un volumen de agua calibrado de 2346.7 litros de agua por hectárea.

Los demás elementos aplicados al cultivo se mantuvieron constantes en todos los sitios de la investigación. La cantidad de elementos nutritivos aplicados mediante fertilización se observan en el (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cantidad ($\text{Ha}\cdot\text{kg}^{-1}$) de elementos nutritivos aportados por el programa de fertilización sobre las unidades experimentales.

Nutriente *	TRATAMIENTOS		
	0% Fe	50% Fe	100% Fe
N	772	772	772
P ₂ O ₅	150	150	150
K ₂ O	404	404	404
CaO	155	155	155
MgO	146	146	146
Fe	0	6.67	13.34
Zn	14	14	14
B	7	7	7

* Acumulado aplicado al suelo y asperjado desde la siembra hasta la inducción de la floración. No incluye el aporte pos-inducción de la floración.

4.5 Toma de muestras y determinaciones

Se realizó un muestreo de suelo compuesto de 20 submuestras a 20 cm de profundidad en cada unidad experimental, las cuales fueron transportadas en recipientes isotérmicos al Centro de Investigaciones CITTED en La Perla (UNED) para valorar las propiedades bioquímicas según la metodología sugerida por García *et al.* (2003). En este mismo laboratorio se obtuvo réplicas para las determinaciones a realizar en los otros laboratorios; CIA (químico completo y propiedades físicas), Agroanálisis de Costa Rica (fraccionamiento del hierro), adicionalmente se dejó una réplica en custodia de cada uno de los 36 suelos, como respaldo para cualquier contingencia.

Se estudiaron las variables físicas, químicas y bioquímicas del suelo, las cuales se analizaron según el orden de suelo: entisol, inceptisol y ultisol.

Entre las variables bioquímicas fueron analizadas la cantidad de materia orgánica (Walkley y Black 1938), respiración microbiana (Alef y Nannipieri 1995), índice de mineralización (Guitián y Carballas 1976), actividad catalasa (Johnson y Temple 1964) y conteo total de

poblaciones mediante la técnica de recuento directo (Weaver *et al.* 1994), que se dividió en recuento de bacterias aeróbicas, anaeróbicas, recuento de hongos y levaduras.

Entre las variables químicas analizadas se obtuvo datos de pH (en H₂O), Acidez, Ca, Mg (KCl 1 M), P, K, Zn, Fe, Mn y Cu (Olsen modificado pH 8.5). La acidez determinada por valoración, el P por espectrofotometría UVV, y el resto de los elementos por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Las variables físicas consideradas en la investigación fueron, conductividad hidráulica, densidad aparente, densidad de partículas, humedad gravimétrica, de acuerdo al manual de métodos del USDA (2004) para los laboratorios de suelos y la textura de acuerdo a la metodología de Bouyoucos citado por Henríquez y Cabalceta (1999).

4.5.1 Fraccionamiento del hierro

Para este análisis se utilizó la metodología descritas por Peña (2004), las distintas determinaciones para el fraccionamiento del Fe en las muestras de suelo se realizaron en el laboratorio Agroanálisis de Costa Rica, en este caso las lecturas se realizaron en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) Modelo Perkin Elmer Analyst 700 equipado con automuestreador y lámpara de cátodo hueco. Para la curva de calibración se emplearon patrones de 0 - 6 ppm de un estándar de Fe Perkin Elmer con valor certificado de 1000 µg/ml ± 3.0 µg/ml, traceable a: NIST SRM #3126 A.

Hierro total

Se pesaron (por duplicado) 0,5 g de suelo seco al aire (< 2 mm) y finamente molido con mortero ágata (hasta alcanzar tamaños de partículas menores a 50 µm), en un vaso de teflón con sistema de seguridad (reactor). Se añadieron 5 ml HNO₃, 4 ml HCl, 1 ml HF, y 10 ml H₂O *milli-Q* (se preparó un blanco con los reactivos para calibrar las medidas correspondientes). Una vez cerrados herméticamente, los reactores de teflón se atacaron en

un microondas especial para digestión ácida. Los extractos se filtraron en matraces de plástico (HF reacciona con el vidrio), y se aforaron con una solución proporcional de los mismos reactivos ácidos (hasta 50 o 100 ml).

De esta forma el hierro total se determina mediante el empleo de tres ácidos inorgánicos, El HNO_3 que destruye la materia inorgánica, el HCl que solubiliza compuestos inorgánicos y el HF único ácido inorgánico que destruye los silicatos. Por consiguiente los compuestos de la muestra de suelo quedan en la solución que se lee en el EAA y por ende ofrece el contenido de hierro total del suelo, es decir la suma de todas las formas de hierro presentes en la muestra.

Hierro soluble

Corresponde a la forma metálica extraíble con agua. Equivale al contenido en la fase soluble del suelo. La extracción se llevó a cabo con agua desionizada (H_2O *milli-Q*), en una relación 1:10 de suelo seco (< 2 mm) y agua durante 3 días de contacto sin agitación previa y por triplicado. Se filtraron los extractos y se determinó el metal por EAA (Graña 1989 citado por Peña 2004).

Hierro de cambio

Para determinar el hierro en las posición de cambio del suelo, la extracción se realizó utilizando 10 g de suelo seco al aire (< 2 mm) en 50 mL de acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$) 1M (pH 7), guardando una relación 1:5. Se agitaron las disoluciones durante 1 hora, se centrifugó a 2000 rpm durante 15 minutos, se filtró y se determinó por EAA (Graña 1989 citado por Peña 2004).

Para obtener el dato de la fracción de hierro de cambio, a esta forma extraída con acetato de amonio se le restó la forma extraída con agua desionizada.

Hierro ligado a la materia orgánica

Se extraen formas ligadas a la materia orgánica. Para ello, se realizó la extracción con pirofosfato sódico ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) 0.1 M tamponado a pH 10.1, en una relación de suelo seco (< 2 mm) y extractante 1:100 con agitación de 16 horas. Se centrifugó a 2000 rpm durante 15 minutos, se le añadió 2 a 4 gotas de floculante al 0.33 % (*Superfloc-100*, 0.1 N), y nuevamente se centrifugó y se filtró, y se determinó por EAA (Baker y Suhr 1982 citados por Peña 2004).

Para obtener el dato de la forma de hierro asociada a la materia orgánica, a esta forma extraída con pirofosfato sódico se le restó la forma extraída con acetato de amonio.

Hierro asociado a óxidos amorfos inorgánicos

Estas formas están asociadas con los óxidos *amorfos* de hierro y manganeso. La extracción se realizó con una disolución de ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 0.2 M) y oxalato amónico ($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0.2 M, tamponado a pH 3, en una relación de suelo seco (< 2 mm y molido) y disolución 1:50, se agitó durante 4 horas en oscuridad. Los extractos se centrifugaron a 2000 rpm (15 minutos), se filtraron y se determinó el hierro por EAA lo antes posible, ya que podían precipitar cristales de oxalato (Graña 1989 citado por Peña 2004).

Para obtener el dato del hierro asociado a óxidos amorfos inorgánica, a la forma extraída con el ácido oxálico y oxalato de amonio se le restó la forma extraída con pirofosfato sódico.

Hierro asociado a óxidos cristalinos

Estas formas están asociadas con los óxidos *cristalinos* de hierro y manganeso. La extracción de los metales se realizó con una mezcla de la disolución anterior, oxálico-oxalato ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0.2 M. + $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0.2 M, y ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) 0.1 M; con relación al suelo seco (< 2 mm y molido) y la disolución (oxálico- oxalato-ascórbico), de 1:50. Las muestras se sumergieron en baño de agua caliente entre 80 y 97 °C con agitación de los

botes contenedores, de forma simultánea y continua (0,5 h). Se centrifugaron a 2000 r.p.m. durante 15 minutos, se filtró y se determinó el hierro por EAA lo antes posible, ya que con el tiempo pueden precipitar cristales de oxalato y aparecer manchas adheridas a los botes contenedores (Graña 1989 citado por Peña 2004).

Para obtener el dato de hierro asociado a los óxidos cristalinos, esta forma extraída con ox-ox ascórbico se le restó la forma extraída con oxálico-oxalato amónico.

Hierro residual

Esta forma está asociada principalmente con los silicatos; se obtuvo a partir de la diferencia entre el contenido total y todas las fracciones anteriores, es decir la extraída con ox-ox ascórbico.

Hierro biodisponible

Se utilizan extractantes de ácidos diluidos, sales o bien agentes acomplejantes. Para determinar la fracción biodisponible en el suelo, Lindsay y Norwell (1978) citados por Peña (2004) proponen la utilización del ácido dietilentriamino penta-acético (DTPA) como extractante de los metales.

En este caso la técnica consistió en utilizar una disolución DTPA 0.005 M. + cloruro de calcio (CaCl_2) 0.01 M. + (trietanolamina) TEA 0.1 M. a pH 7.3, ajustado con HCl 1N. La relación de suelo seco (< 2 mm) y extractante fue de 1:2 y se agitó durante 2 horas. Se centrifugó a 2000 rpm durante 15 minutos, se filtró y se determinaron por EAA. Los extractos y la medición se realizaron por duplicado y se expresaron en $\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ (Peña 2004).

La forma biodisponible del hierro es una fracción independiente del fraccionamiento anterior, pues puede contener hierro disponible proveniente de las otras fracciones, en este sentido al

igual que el hierro soluble que presenta la misma situación, no depende de cálculos con ninguna de las otras fracciones de hierro.

4.5.2 Variables bioquímicas y microbiológicas evaluadas

Para estas variables se evaluó: C-CO₂ (respiración microbiana) mediante incubación estática; materia orgánica a través de la oxidación húmeda; índice de mineralización, que relaciona las anteriores propiedades; conteo de poblaciones por plato petri y actividad catalasa mediante la reacción del peróxido.

Materia orgánica

La materia orgánica (C-total) se determinó de la siguiente forma: en un balón aforado (100 ml) se agrega entre 0.2 a 0.5 gramos de suelo finamente molido y homogenizado. Se agregan 20 ml de dicromato K₂Cr₂O₇ [1M]. Se agregan 20 ml de ácido sulfúrico H₂SO₄ [1M], se deja enfriar posterior a la reacción exotérmica. Se afora a 100 ml con agua destilada. Se toma una alícuota de 10 ml. Se agregan 2 ml de ácido fosfórico [85%]. Se agregan 2 gotas de indicador Difenilamina, y se valora con sulfato de amonio y Fe II (Walkley y Black 1938).

Se aplica la siguiente fórmula:

$$\%MO = \frac{[(V1 \times M1) - (V2 - M2 \times 10)] \times 0.67}{Peso\ suelo}$$

Conteo de poblaciones

Esta metodología permite conocer la cantidad de diferentes microorganismos (principalmente bacterias, actinomicetos y hongos). Tomando en consideración que los microorganismos del suelo son muy sensibles a ligeros cambios, la técnica de recuento directo sirve como un buen bioindicador de salud y calidad de suelos, en cuanto a la cantidad de comunidades microbianas. El método de recuento en placa se utiliza muy a menudo para contar sólo las células viables (capaces de dividirse), de allí que el resultado

se expresa como unidades formadoras de colonias (u.f.c.) por unidad de volumen o masa de suelo muestreada, ya que la teoría indica que una colonia proviene de la división de una sola célula.



Figura 13. Desarrollo de colonias de microorganismos en caja petri. Junio 2008.

En el método de placa extendida, una muestra pequeña de suelo diluida (generalmente 0.1 ml) se extiende sobre la superficie de la placa con un medio de cultivo selectivo para el microorganismo a aislar y se incuba hasta que las colonias sean visibles a simple vista. Para minimizar errores al calcular el tamaño de la población, se ha determinado prácticamente que debe haber entre 30 y 300 colonias por placa de cultivo. Es por ello que para suspensiones densas es necesario realizar varias diluciones del cultivo microbiano (Rosales *et al.* 2008).

Respiración microbiana C-CO₂

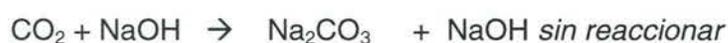
La actividad microbiana del suelo puede ser estimada indirectamente en la determinación de la respiración basal del medio. Esta consiste en determinar la concentración de CO₂ desprendido (función de la actividad biológica y del contenido del suelo en carbono orgánico fácilmente mineralizable), y que es capturado en hidróxido (NaOH) durante 10 días de incubación bajo condiciones ambientales óptimas (Parkinson, 1981; Alef y Nannipieri, 1995, citados por Peña (2004).



Figura 14. Técnica de incubación del suelo para determinación de la respiración microbiana.

Se efectúa un montaje (por duplicado) utilizando un recipiente de vidrio de boca ancha provisto de cierre hermético. En él, se introduce un recipiente pequeño con una alícuota de 25 g del suelo húmedo (humedad previamente determinada a 105 °C) y un vial con 10 ml de NaOH 0.1N, que se carbonatará en presencia del CO₂ procedente de la respiración del suelo. Dentro del mismo frasco de boca ancha se añaden 25 ml de agua destilada, de tal manera que el suelo mantenga la humedad óptima durante la incubación. El recipiente con sus componentes se mantiene en óptimas condiciones, es decir a 25 °C, en una cámara incubadora o estufa durante 10 días; además, se hace un segundo montaje con NaOH pero sin suelo (muestra en blanco). La solución de NaOH se cambia a los 5 días de la incubación, y en esa solución que estuvo expuesta al suelo se valora la concentración de CO₂ capturado. Hay que procurar mantener cerrado el vial con la disolución de NaOH utilizado, pues ésta puede adsorber CO₂ atmosférico.

De cada muestra de vial con la solución de NaOH, se toma una alícuota de 2 ml (por duplicado) a la que es añadida, en un vasito de fondo cónico, un poco de agua destilada (1-2 ml aprox.) y 1 ml de BaCl₂ al 20 %, para que los carbonatos que se pueden haber formado precipiten en forma de BaCO₃. Lo que ocurre es:



La técnica implica calcular la cantidad de NaOH que queda sin reaccionar en el proceso de respiración (exceso), valorando con HCl 0.1N con bureta donde se utiliza fenoftaleína como indicador. El CO₂ desprendido por el suelo se calcula como diferencia entre el valor de titulación de un blanco sin suelo (NaOH) y el de cada muestra expuesta a la actividad microbiana (NaOH + CO₂).

El cálculo de la cantidad de CO₂ desprendido de la mineralización utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{CO}_2 = (B-M) \times N_{\text{HCl}} \times (44/2) \times (10/2) \times 100 / [25(\text{ss/sh})]$$

donde:

CO₂ = mg CO₂ • 100 g⁻¹ de suelo seco a 105 °C

B = volumen de HCl consumido por el blanco

M = volumen de HCl consumido por la muestra

N_{HCl} = Concentración o normalidad exacta del ácido clorhídrico

(44/22) = Peso equivalente del CO₂ emitido

(10/2) = alícuota de la muestra NaOH + CO₂ capturado

ss/sh = suelo seco (g) a 105 °C por cada gramo de suelo húmedo

Actividad catalasa

Se utilizó el método empleado por Peña (2004), el cual proviene del método original de oxidación por peróxido y valorado con permanganato de Johnson & Temple (1964). Se presenta en tres pasos A, B y C.

(A). Muestra de suelo 0,5 g, suelo húmedo como viene del campo. Se coloca en Erlenmeyer, preferible de 150 o 225 ml. Añadir 40 ml H₂O destilada y agitar 30 min. Añadir 5 ml H₂O₂ 1:100 y agitar 10 min. Añadir 5 ml H₂SO₄ 1,5M. Pasar la solución por papel filtro.

(B). Controles: Igual que paso A. Sustituir H₂O₂ peróxido por 5 ml de H₂O destilada.

(C). Blancos: Igual que paso A. Eliminar uso del suelo. Es decir: 40 H₂O, 5 H₂O₂, 5 H₂SO₄ = 50 ml de solución.



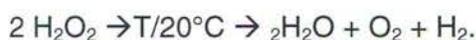
Figura 15. Preparación de las muestras para la determinación de la actividad catalasa.

Para la valoración; de la muestra con suelo del paso A, se toma una alícuota de 10 ml. Se valora con KMnO₄ 0,01M (Permanganato de potasio). El cambio de color que se da es rojo morado a incoloro (punto final es gota rosada). Los cálculos a realizar son los siguientes:

$$AC = [C - (A - B)] \times N_{[KMnO_4]} \times 0.5 \times (50/25) \times 6/0.5 \times (s.s / s.h)$$

Las unidades que se obtienen son: mmoles H₂O₂ consumido/g.suelo seco h⁻¹.

La reacción implícita es :



El peróxido es tóxico a la microflora del suelo por lo que actúa la catalasa (peroxidasa) para degradarlo. Como nota importante se debe indicar que tras la reacción con el Peróxido, no demorar mucho ya que reacciona con aire y se pierde el efecto, lo que podría dañar la medida analítica.

Índice de mineralización

De acuerdo con Rosales *et al.* (2008), el índice de mineralización se refiere al cálculo de la cantidad de C-CO₂ que se relaciona con el C total de la materia orgánica y de donde se obtiene la proporción de la materia orgánica que es lábil o mineralizable. El índice de mineralización se obtiene de la siguiente manera:

$$IM = \frac{gCO_2 \text{ (respiración)}}{gC \text{ total (M.O)}}$$

Todas estas variables provenientes de métodos y cálculos descritos anteriormente.

4.5.3 Variables de respuesta fisiológica y nutricional del cultivo

Se muestrearon las variables fisiológicas de mayor trascendencia práctica en el cultivo de la piña, peso fresco de planta, número de hojas, largo de hoja D, ancho de la hoja D, peso fresco de la raíz (se dividió en raíz con tejido verde vivo y raíz con tejido necrótico), peso seco de la raíz, se determinó adicionalmente en función de las anteriores la tasa de crecimiento acumulada ajustada y el porcentaje de raíz sana.

Las variables de respuesta nutricional se realizó con base en un muestreo compuesto de 20 hojas D, tomadas de plantas de condición uniforme de cada parcela experimental, estas hojas D, fueron analizadas en el laboratorio de suelos y foliares de la Universidad de Costa Rica mediante un análisis químico completo practicado al tercio apical, tercio medio y tercio basal, de la siguiente forma, N (por combustión seca)², P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda³ y determinada por Espectrofotometría de Emisión Atómica con Plasma.



Figura 16. Técnica de cuantificación del peso de planta en campo.

² De acuerdo al Protocolo CIA Universidad de Costa Rica CIA-SC09-01-01-P06

³ De acuerdo al Protocolo CIA Universidad de Costa Rica CIA-SC09-01-01-P10

Tasa de crecimiento acumulada ajustada

Se realizó mediante la técnica ordinaria de la finca, que consiste en la elección de 3 individuos que representan la generalidad de la condición de porte de plantas en la unidad de siembra (unidad experimental en este caso), para cuantificar el peso en kilogramos se utilizó un balancín de la marca Chatillón de 6 kg de capacidad. El peso se determina una vez que la raíz ha sido separada de la planta. Con esta variable se calculó la tasa de crecimiento acumulada ajustada, empleada para las comparaciones entre fincas. De esta forma con el dato de peso inicial de la semilla utilizado en las unidades experimentales, la fecha de establecimiento (fecha de siembra) de cada unidad experimental y la fecha del muestreo, se calculó la ganancia de peso por día, la cual se llamó tasa de crecimiento acumulada ajustada.

Número de hojas por planta

Se realizó mediante la separación y conteo de las hoja de cada una de las plantas muestreadas para peso de planta.



Figura 17. Técnica para la determinación del número de hojas en campo.

Es un muestreo de tipo destructivo, las hojas que se contaron son las que presentaban más de 10 cm de tejido verde sano (para el caso de las hojas más viejas) y las que tenían al menos 10 cm de longitud (en el caso de las hojas más nuevas).

Peso de la raíz

Las plantas fueron extraídas del suelo con extremo cuidado, procurando no perder raíces por desprendimiento, una vez con la planta separada del suelo se procedió a quitarle el sistema radicular con ayuda de un cuchillo, depositando este en una bolsa plástica junto con el suelo adherido a ella.



Figura 18. Determinación del peso de la raíz.

Las bolsas se identificaron con el nombre de la unidad experimental a la que pertenecían y el número de planta de la que se tomó, con esto, en el laboratorio se procedió a lavar las raíces, secarlas a temperatura ambiente por espacio de 3 horas y luego se desprendió todo el sistema radicular de cada muestra (planta) sobre una mesa se separó las raíces de tejido succulento de las raíces de tejido necrótico, se procedió a pesar en balanza granataria y tabular ambos datos, de esta forma la sumatoria de ambos corresponde al peso fresco total. Una vez que se determinó el peso fresco las muestras fueron puestas en estufa a 65 °C durante 48 horas, posterior a este tiempo se determinó el peso seco en balanza granataria.

Porcentaje de raíz sana

Con el dato de peso fresco de la raíz de tejido succulento y peso fresco de la raíz de tejido necrótico, cuya suma corresponde al peso fresco total de la raíz se procedió a calcular el porcentaje de raíz de tejido succulento y se le llamó porcentaje de raíz sana.

Largo y ancho de la hoja D

La primera hoja que se desprendía durante el conteo destructivo de hojas, era la hoja D, a la cual se le midió desde su base hasta su parte apical. Esta medición se realizó a cada hoja D, muestreada para el peso de planta.



Figura 19. Determinación del ancho de la hoja D.

Posterior a la determinación del largo de hoja, también se procedió a medir la parte media de la hoja D; esta medición se realizó a cada hoja D muestreada para el peso de planta.

Muestra foliar para análisis químico

Las variables de respuesta nutricional correspondió a un muestreo de 20 hojas D, tomadas de plantas de condición uniforme de cada unidad experimental.



Figura 20. Preparación de la muestra foliar en campo.

Estas hojas D, fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica mediante un análisis químico completo practicado al tercio apical, tercio medio y tercio basal.

4.6 Diseño experimental y análisis de datos

En cada orden de suelo los tratamientos se distribuyeron sobre las 12 unidades experimentales, mediante la generación de números aleatorios de Excel 2007.

Para el análisis estadístico de los datos se empleó una regresión escalonada en SAS 6.11, con el objetivo de seleccionar de todas las variables, únicamente aquellas que mostraban significancia estadística $p < 0.05$.

Las variables independientes corresponden a las distintas formas de Fe y las variables físicas de suelos, mientras que las dependientes corresponden a las variables bioquímicas, microbiológicas así como las variables de respuesta fisiológica y nutricional del cultivo.

Una vez elegidas las variables a analizar, se trataron de la siguiente forma:

Variables dependientes bioquímicas y microbiológicas: se sometieron a un modelo de regresión lineal GLM de Statistica 6.0, debido a que su única fuente de variación era el orden de suelo.

En estos casos se utilizó el siguiente modelo matemático:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta(X_{ij} - X) + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = variable de respuesta (bioquímicas y microbiológicas) que se analiza.

μ = media general.

α_i = variación causada por la variable regresora.

β = coeficiente de regresión lineal entre variable dependiente "Y" y covariable X.

$(X_{ij} - X)$ = efecto debido a la covariable.

ε_{ij} = error residual aleatorio dentro de cada tratamiento.

Las variables dependientes de respuesta fisiológica y nutricional del cultivo: se analizaron mediante un modelo bifactorial, ya que adicional al orden de suelo existía influencia de otra fuente de variación, el tratamiento. De tal forma que corresponde a un experimento bifactorial con diseño completamente aleatorizado.

En este caso el modelo matemático fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = variable de respuesta fisiológica y nutricional del cultivo que se analiza.

μ = media general.

α_i = variación causada por el primer factor principal (orden de suelo).

β_j = variación causada por el segundo factor principal (nivel de Fe foliar).

$\alpha\beta_{ij}$ = variación causada por el efecto conjunto (interacción de ambos factores).

ε_{ij} = error residual aleatorio dentro de cada tratamiento.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fincas donde se desarrolló la investigación pertenecen a órdenes distintos de suelos, así mismo, presentan diferencias importantes en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas, se nota influencia de la génesis de suelos así como de los factores formadores del mismo.

El clima es un factor de gran importancia, el cual influye significativamente sobre la diversas variables de crecimiento del cultivo de piña, presentándose diferencias en grados día acumulados $p < 0.05$ (Fig. 21) entre las fincas durante los meses en que se desarrolló la investigación.

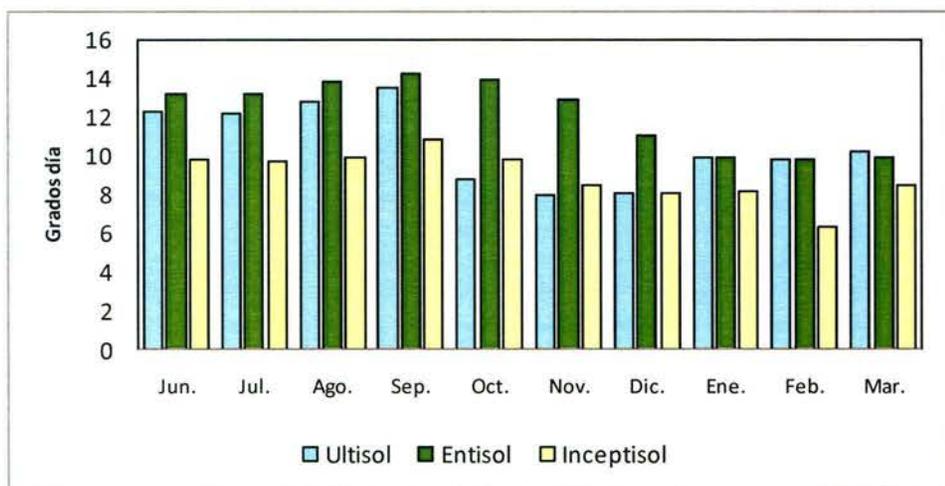


Figura 21. Grados día acumulados por mes en cada una de las fincas. Cálculo realizado considerando una temperatura base de 14°C y temperatura promedio diaria de la estación meteorológica ubicada en cada finca.

Durante los meses de la investigación, Frutas tropicales Venecia (suelo inceptisol) presentó los grados día más bajos $p < 0.05$ con 8.93 grados día (Tukey $\alpha = 0.05$), seguida de Industria Cartonera Inca (suelo ultisol) con 10.54 grados día y con mayor promedio de grados día Agrícola Industrial San Cayetano suelo entisol con 12.18 grados día.⁴ Lo anterior fue

⁴ En Banacol División Piña se le atribuye a las diferencias climáticas entre estas fincas las diferencias en porte y peso de plantación al momento de la inducción de la floración $FTV < INCA < AISC$, así como las diferencias en la conversión peso planta/peso fruta $FTV > INCA > AISC$.

importante para la interpretación de algunas diferencias encontradas sobre variables de crecimiento del cultivo en donde se encontró independencia estadística de los tratamientos.

5.1 Distribución de hierro en las fincas

El trabajo de interpolación geoestadística con Surfer v/7.0, generó un mapa por finca de distribución de Fe. La ubicación de las parcelas experimentales en lotes que reunieron las características de contenidos bajos, medios y altos de este elemento, mediante análisis históricos de las fincas bajo la solución extractora Mehlich 3, se presentan en (Fig. 22, 23 y 24), la figura azul ubica el lote seleccionado para el establecimiento de las parcelas experimentales en cada finca.

5.1.1 Industria Cartonera Inca

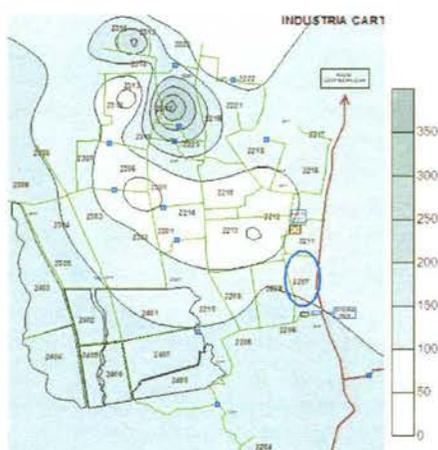


Figura 22. Distribución de hierro en Finca INCA. El círculo azul señala el lote del ensayo, rango 50-100 ppm de Fe, Mehlich 3. Interpolación Kriging de Surfer V7.0.

5.1.2 Agrícola Industrial San Cayetano

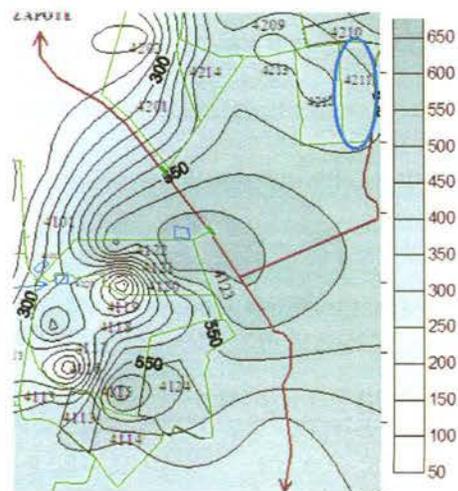


Figura 23. Distribución de hierro en Finca AISC. El círculo azul señala el lote del ensayo, rango 500-550 ppm de Fe, Mehlich 3. Interpolación Kriging de Surfer V7.0.

5.1.3 Frutas Tropicales Venecia

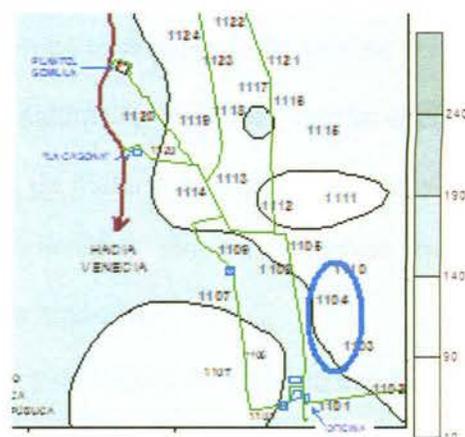


Figura 24. Distribución de hierro en Finca FTV. El círculo azul señala el lote del ensayo, rango 90-140 ppm de Fe, Mehlich 3. Interpolación Kriging de Surfer V7.0.

Los resultados de los análisis del hierro biodisponible (DTPA) efectuado para garantizar los contenidos altos, medios y bajos de hierro en cada lote seleccionado, se realizó en cada una de las 12 parcelas de las fincas. Los resultados se presentan como promedio de 12 unidades experimentales en el cuadro 4. Estos datos se generaron mediante muestreo del suelo en el área experimental previo al establecimiento del cultivo para garantizar la

diferencia en la biodisponibilidad de hierro en las tres fincas (niveles altos, medios y bajos), de esta forma se confirmaron los resultados exploratorios obtenidos con la interpolación Kriging de Surfer v7.0 con los análisis de suelo históricos mediante la solución extractora Mehlich 3.

Cuadro 4. Contenidos exploratorios de hierro en el suelo (DTPA). Promedios de 12 muestras por finca ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

ESTADÍSTICO	ORDEN DE SUELO		
	ULTISOL	ENTISOL	INCEPTISOL
Ámbito	9.58 – 35.92	101.80 – 236.80	23.38 – 46.66
Promedio	22.28	184.19	33.49
D.E	7.83	46.65	6.77
N	12	12	12

5.2 Características fisicoquímicas generales de los órdenes de suelos

Desde el punto de vista química y fertilidad (cuadro 5) y de acuerdo con Bertsch (1998), los suelos donde se desarrolló la investigación son de fertilidad media, de alta acidez intercambiable, aunque de saturación de acidez media, el pH de suelo es bajo.

En cuanto a los contenidos de materia orgánica, el ultisol y el inceptisol de acuerdo con Nuñez (1992) poseen contenidos medios, mientras que el suelo entisol posee contenidos bajos de materia orgánica.

Desde el punto de vista física de suelos de acuerdo con Henríquez y Cabalceta (1999) la conductividad hidráulica se clasifica como muy lenta en los suelos inceptisol y ultisol y moderada en el suelo entisol.

En cuanto a la humedad gravimétrica, debido al método analítico los datos corresponden a la condición de la muestra en el momento de la toma, por lo que evidentemente varió durante los distintos días y meses de la investigación tal como lo señalan Henríquez y Cabalceta (1999), sin embargo a pesar de haberse efectuado el muestreo bajo condiciones similares, se nota una diferencia de más del 50% entre el suelo inceptisol y el entisol, por su parte el suelo ultisol presentó una condición intermedia de humedad

entre estos, lo que ratifica las diferencias en textura y materia orgánica entre los suelos y su influencia en los contenidos de humedad.

Por otra parte, el agua disponible del suelo fue igual para el entisol y el inceptisol, aunque pertenecen a una clase textural diferente, sin embargo el agua disponible del ultisol a pesar de ser de textura arcillosa fue ligeramente superior con promedio de 6,64%, lo cual de acuerdo con Nuñez (1992), corresponde con un dato más a fin a una arena franca, y el inceptisol y entisol por su parte con promedio de 4,68% corresponden con clases texturales más livianas.

En esta situación posiblemente influyó la compactación de las muestras, dada su textura y los contenidos de humedad al momento del muestreo, pues tomando como parámetro de análisis la conductividad hidráulica del suelo, se encontró que, en algunas unidades experimentales del suelo ultisol la muestra no condujo humedad (conductividad hidráulica=cero), situación similar se presentó en algunas unidades experimentales del inceptisol, donde la conductividad hidráulica fue muy lenta ($0,01 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$) para el tipo de textura.

Debido a lo anterior se considera razonable el dato de agua disponible para el suelo entisol, Nuñez (1992), pero no los datos obtenidos para los suelos inceptisol y ultisol, donde los valores son muy bajos para el tipo de textura que estos poseen, y atribuibles probablemente a un error de muestreo (dadas las características texturales de estos suelos, no debió tomarse la muestra en anillos concéntricos, ya que se provocó compactación de la muestra). Para evitar esta situación es preferible tomar una muestra disturbada y colocarla en anillos en el laboratorio, con esto se consigue evitar la compactación de la muestra.

Los datos anteriores se presentan resumidos en el cuadro 5 y a manera de información general de las diferentes propiedades de los suelos donde se desarrolló la investigación.

Cuadro 5. Características fisicoquímicas generales de los suelos estudiados.

Orden del suelo	PROPIEDADES QUÍMICAS					PROPIEDADES FÍSICAS			
	pH H ₂ O	CICE cmol(+)/L	Acidez cmol(+)/L	Saturación de Acidez (%)	Materia Orgánica (%)	Conductividad Hidráulica cm·h ⁻¹	Humedad Gravimétrica (%)*	Agua Disponible (%)	Clase Textural
Entisol	4.36b	6.65a	2.42a	36.51a	0.89a	4.45b	19.78a	4.68a	Fa
Inceptisol	4.45b	8.61b	2.48a	29.74a	3.92c	0.36a	48.06c	4.68a	FAa
Ultisol	4.11a	6.76a	2.21a	33.26a	1.76b	0.31a	30.89b	6.64b	A
Rep.	12	12	12	12	12	12	12	12	12

*Al momento del muestreo.

5.3 Determinaciones y nexos de las formas de hierro con el orden de suelo

El cuadro 6, presenta un resumen de las principales fracciones de las formas de hierro que componen cada orden de suelo estudiado.

Cuadro 6. Fracciones de hierro en tres órdenes de suelo (valores promedio de 12 unidades experimentales por orden de suelo).

FORMAS DE HIERRO EN EL SUELO EN mg·kg ⁻¹	ORDENES DE SUELO														
	ENTISOL					INCEPTISOL					ULTISOL				
	media	min	max	d.e	% del Total	media	min	max	d.e	% del Total	media	min	max	d.e	% del Total
Soluble	0.74	0.45	1.01	0.16	0.0028%	0.09	0.00	0.31	0.08	0.0002%	0.21	0.00	0.60	0.18	0.0004%
De cambio	0.28	0.01	0.56	0.18	0.0010%	1.57	1.19	1.78	0.19	0.0030%	0.83	0.38	1.12	0.25	0.0015%
Asociado a la materia orgánica	2,023.48	1,568.00	2,370.78	249.61	7.6658%	5,330.63	1,871.48	7,228.04	1,569.61	10.2225%	814.46	300.95	1,281.59	276.00	1.4810%
Asociado a óxidos amorfos	601.29	99.00	1,288.00	373.15	2.2779%	3,646.17	202.00	5,287.00	1,492.03	6.9922%	3,756.50	2,507.00	5,173.00	788.25	6.8306%
Asociado a óxidos cristalinos	14,936.71	12,339.75	19,831.75	1,868.01	56.5865%	29,351.23	24,481.50	33,074.25	2,574.76	56.2864%	18,830.19	16,096.25	26,662.50	2,567.59	34.2398%
Residual	8,833.75	1,466.25	14,220.00	3,320.59	33.4659%	13,816.56	7,541.25	24,225.00	4,672.31	26.4958%	31,592.81	18,180.00	40,882.50	6,180.75	57.4467%
Total	26,396.25	22,545.00	31,995.00	2,676.86	100.0000%	52,146.25	46,935.00	57,945.00	4,031.88	100.0000%	54,995.00	48,900.00	64,050.00	4,886.31	100.0000%
Biodisponible*	450.38	255.10	631.80	131.27	1.7062%	66.97	21.50	110.53	22.61	0.1284%	39.92	16.22	53.59	11.98	0.0726%

*No se incluye en el cálculo % del total.

Es importante resaltar la mayor cantidad de hierro de cambio y hierro asociado a la materia orgánica en el suelo inceptisol que en los otros órdenes, y la mayor cantidad de hierro residual en el ultisol que en los otros suelos, a pesar de esto el hierro soluble y biodisponible fue superior en el entisol. La discusión y posibles explicaciones de estos resultados se abordan en los apartados siguientes.

5.3.1 Hierro total

Como se observa en la (Fig. 25), el suelo ultisol y el inceptisol presentaron la mayor cantidad de hierro total, esto concuerda con lo reportado por Tournon y Alvarado (1997) en cuanto a la mineralogía, origen laterítico y contenidos de Bauxita de estos suelos, que según Klein y Hurlbut (1997), en su mayor parte son mezclas que contienen hierro.

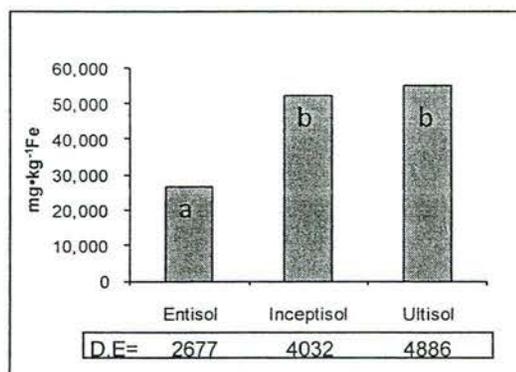


Figura 25. Hierro total en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Fassbender y Bornemisza (1987), señalan que las rocas y minerales son una fuente muy importante de los elementos menores catiónicos y que el hierro es un componente importante tanto de silicatos primarios como de minerales de arcilla. En este sentido, si la roca madre es el material base sobre el cual influyeron los demás factores formadores del suelo (Jenny 1941), para originar una capa dinámica superficial en la corteza terrestre compuesta texturalmente por tres diferentes partículas "arena, limo y arcilla" donde esta última es la más importante desde el punto de vista de la química y la fertilidad del suelo (Henríquez y Cabalceta 1999), es entonces razonable esperar que si un suelo posee poca cantidad de arcillas (menos de 10%) como el suelo entisol de Agrícola Industrial San Cayetano (Fig. 31) y clasificado como franco arenoso, posiblemente este suelo presente menores cantidades de los diferentes elementos catiónicos (entre estos el Hierro).

Por otra parte, a pesar de la presencia de laterita, indicada por Denyer y Kussmaul (2000) para los suelos de la región donde se ubica Agrícola Industrial San Cayetano, la clase textural del suelo y su consecuente escaso contenido de arcilla (Fig. 26) podría ser la condición que influencia el menor contenido de Fe total con respecto a los otros órdenes de suelo, ya que para la extracción analítica del hierro total el HNO_3 destruye la materia orgánica, el HCL solubiliza compuestos inorgánicos, mientras que el HF

destruye los silicatos (arcillas). Pero en el caso específico del entisol, los altos contenidos de limo y arena podrían no estar siendo totalmente disueltos por estos compuestos y ser esta la razón de los menores contenidos de hierro total con respecto a los otros suelos.

En general los valores totales encontrados en los tres suelos son consistentes con las cantidades de hierro total reportadas por Kaúrichev (1984) citado por Acevedo (2004) el cual menciona que los contenidos de Fe total suelen ser de 20000 a 60000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y cuyo contenido depende del suelo y de la roca madre.

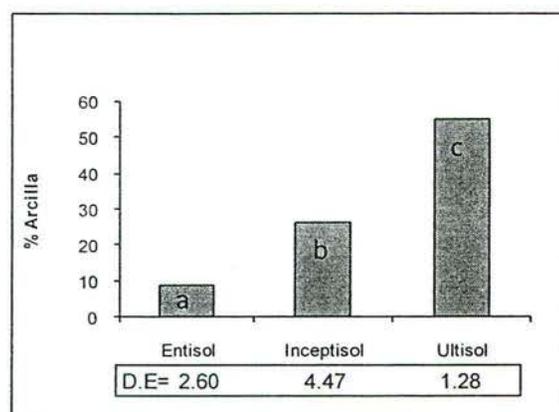


Figura 26. Contenidos de arcilla en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

La figura 26 muestra que el contenido de la fracción de arcilla en el suelo entisol es tres veces menor que el suelo inceptisol y seis veces menor que el ultisol. Por lo tanto, los contenidos de Fe provenientes de la fracción de silicatos del entisol, dado su significativo menor contenido de arcilla, es de esperar que sean menores que los otros suelos y ratifica por tanto la importancia de los silicatos primarios y los minerales de arcilla citados por Fassbender y Bornemisza (1987) como fuente de este elemento.

Por otra parte, la razón por la que el suelo inceptisol no presenta diferencias significativas en la fracción de hierro total con el suelo ultisol, a pesar de tener 51% menos contenido de arcilla, tiene su explicación en las diferencias específicas entre

estos órdenes en las fracciones residual y la asociada a óxidos cristalinos, las cuales se discutirán en sus respectivos apartados.

5.3.2 Hierro asociado a óxidos cristalinos

Esta fracción representa una de las más importantes fracciones de Fe del suelo. Los reactivos y el proceso analítico de laboratorio que se utilizan para esta fracción se hace con el objetivo de disolver y cuantificar únicamente el Fe asociado a los minerales de arcilla (óxidos e hidróxidos).

En esta fracción el suelo que presentó los mayores valores fue el inceptisol, como se muestra en la figura 27.

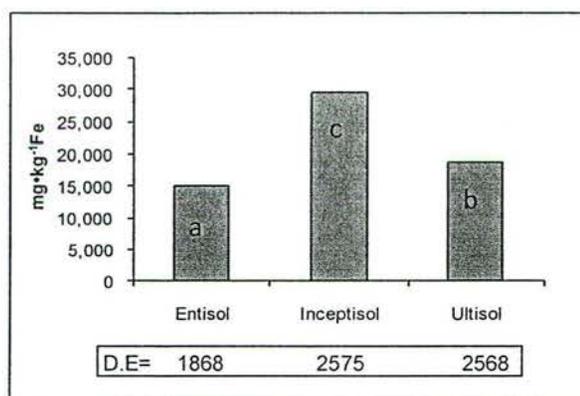


Figura 27. Hierro asociado a óxidos cristalinos en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Esta fracción es superior en el inceptisol, posiblemente debido a la condición de suelo más joven con respecto al ultisol, lo cual le confiere mayor riqueza en óxidos e hidróxidos provenientes de materiales tanto de origen volcánico como de origen aluvial, y a su formación de lahares finos sin diferenciar como se infiere del mapa geológico de MINAE (1982) y como lo señala la unidad geomorfológica de acuerdo con SEPSA (1980c). Lo cual es consistente además con Acevedo *et al.* (2004) que menciona a los óxidos de hierro como productos de neoformación proveniente de la alteración de rocas

y suelo y debido a que no se encuentran unidos química o estructuralmente a los silicatos, éstos se encuentran en la forma de óxidos libres. Estos investigadores mencionan que los óxidos de hierro se forman rápidamente por disolución en pH bajos (tal como los suelos ultisol e inceptisol estudiados, cuadro 5) y, una vez que las condiciones del suelo se estabilizan, la disolución es extremadamente lenta. La disolución del hierro es originada cuando el Fe (III) es reducido a Fe (II) por la transferencia de electrones, dada por la condición deficiente de oxígeno. Nuevos óxidos de hierro se forman cuando se reintegra el oxígeno al sistema. Por último reiteran que los óxidos de hierro reductomórficos del suelo pueden ser de formación joven dada por condiciones de oxidación-reducción, (mecanismos de movilización e inmovilización del hierro dentro del perfil), pudiendo ser esta la razón por la cual el contenido de hierro asociado a óxidos cristalinos sea mayor en el inceptisol dado que es un suelo más reciente que el ultisol.

De la misma forma, el suelo entisol a pesar de ser más reciente que el inceptisol, su condición de suelo franco arenoso y bajos contenidos de arcilla (Fig. 26), posiblemente está sujeto a lavado de este tipo de compuestos y por ende su contenido es menor que el de los otros suelos de textura más pesada.

En general, la cantidad de Fe asociado a óxidos cristalinos fue mayor (Fig. 27) que el reportado por Serrano y Adams (2000) en suelos ácidos de Venezuela, los cuales obtuvieron como resultado valores entre 2600 y 8200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Sin embargo, Peña (2004) encontró valores de Fe asociado a óxidos cristalinos entre 8700 y 60800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en suelos ligeramente ácidos desarrollados sobre serpentinitas en Galicia España, lo cual en general es consistente con los valores encontrados en los diferentes órdenes de suelo.

5.3.3 Hierro asociado a óxidos amorfos inorgánicos

La metodología analítica empleada cuantifica el hierro asociado a los óxidos amorfos de hierro y manganeso.

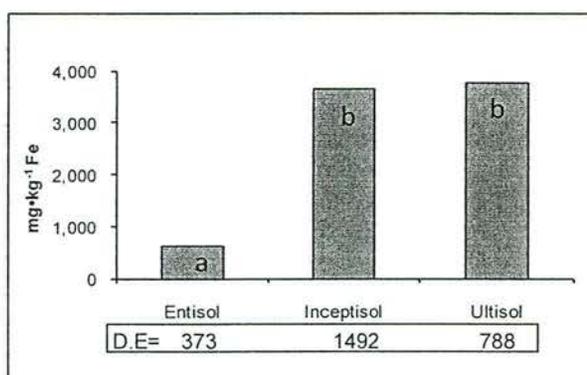


Figura 28. Hierro asociado a óxidos amorfos inorgánicos en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

No se encontraron diferencias significativas entre el suelo inceptisol y el ultisol, cuyos valores estuvieron alrededor de 3650 y 3750 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Fe asociado a óxidos amorfos inorgánicos (Fig. 28). Sin embargo estos si fueron significativamente diferentes con el entisol, el cual solo alcanzó 600 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Los valores de hierro asociado a óxidos amorfos inorgánicos encontrados en los suelos, concuerdan con afirmaciones de Wild (1989), este investigador menciona a los óxidos de hierro entre los componentes principales de los suelos del trópico y que existen principalmente como formas amorfas y cristalinas, explicándose gran cantidad de este por la intensa meteorización. Es de esperar por tanto mayor cantidad de esta forma como también la asociada a óxidos cristalinos (Fig. 27) en los suelos ultisol e inceptisol. Los valores más bajos de hierro asociado a estas formas en el entisol se explican por el origen más reciente de este suelo y al lavado al que está expuesto dada su textura arenosa.

Serrano y Adams (2000) han reportado valores desde 690 hasta 4600 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en suelos ácidos de Venezuela, mientras Peña (2004) encontró valores desde 1317 hasta 15836 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de hierro asociado a óxidos amorfos en Galicia, España.

5.3.4 Hierro asociado a la materia orgánica

El hierro asociado a la materia orgánica fue significativamente mayor en el suelo inceptisol (Fig. 29), que en los otros suelos. Adicionalmente el suelo entisol presentó un contenido de hierro asociado a la materia orgánica superior al suelo ultisol.

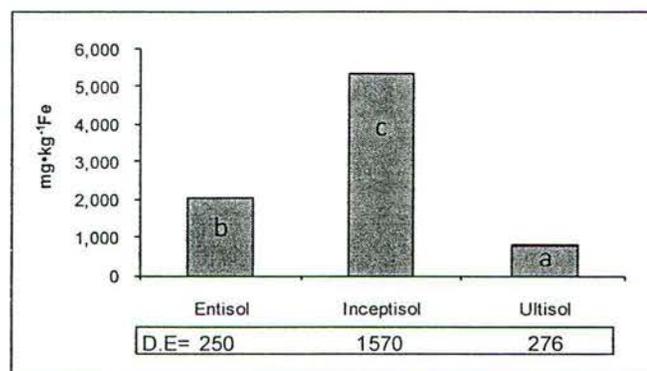


Figura 29. Hierro asociado a la materia orgánica en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Dados los valores de materia orgánica del inceptisol que fueron significativamente diferentes a los otros suelos (Cuadro 5), es de esperar los altos contenidos de hierro asociado con esta fracción. Sin embargo, el suelo entisol posee menos cantidad de materia orgánica que el suelo ultisol, pero en cuanto al hierro asociado a esta fracción (Fig. 29) el entisol presenta en promedio un poco más de dos veces de contenido de Fe en esta fracción que el ultisol (Cuadro 6).

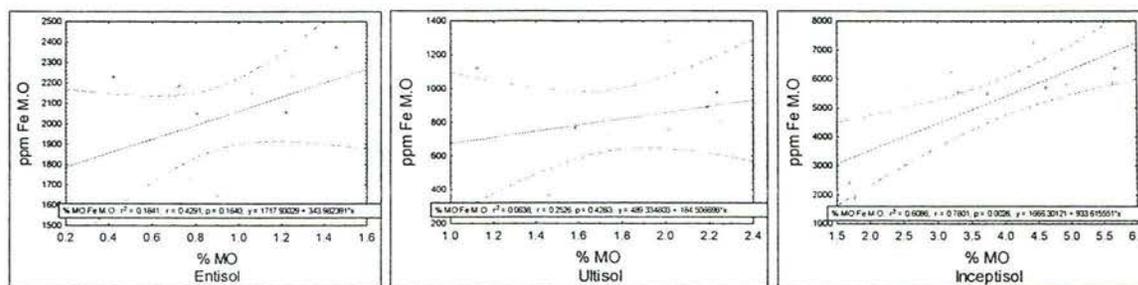


Figura 30. Contenido de materia orgánica en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

La fuente de materia orgánica es un factor que posiblemente explica parte de los mayores contenidos de Fe asociados en esta fracción en el entisol con respecto al ultisol, dados los mayores contenidos de hierro soluble y biodisponible en este suelo, es de esperar que los restos vegetales de la fracción orgánica también sean altos en este micronutriente, en este sentido Viets (1962) y Suman (1985) citados por Serrano y Adams (2000) indican que la materia orgánica se considera potencialmente asimilable para las plantas, afirmación importante de analizar en la absorción de hierro por el cultivo de piña más adelante.

Ahora bien, si se toma el argumento anterior para explicar, por qué el contenido de hierro asociado a la materia orgánica en el inceptisol es mayor que en el entisol, se encuentra que también es válido y se debe a una razón de cantidad de materia orgánica. Puesto que al calcular la relación existente entre el contenido de M.O y el Fe asociado con esa fracción a partir de los datos del cuadro 5 y 6, se encuentra que por cada 1% de M.O en el inceptisol se obtiene $1363 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Fe asociado a la fracción orgánica, mientras que en el entisol se obtienen $2273 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, es decir 1.67 veces más. En el ultisol se obtiene por cada 1% de M.O solamente $462 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, es decir casi 5 veces menos que en el entisol, estos datos, a pesar de ser muy generales, parecen indicar como se mencionó en el párrafo anterior, que existe una relación entre la fuente de la materia orgánica con los contenidos de hierro asociados con esa fracción.

Por otra parte aunque no se encontró relación estadística entre los contenidos de materia orgánica y el hierro asociado con esta fracción, la regresión por finca (Fig. 30), sugieren que existe una relación entre los contenidos de materia orgánica y el hierro asociado con esta fracción, pues los tres gráficos mantienen una tendencia creciente, y las diferencias en la magnitud de la pendiente probablemente se deban a lo expresado anteriormente referente a la influencia de la fuente de la materia orgánica, sobre la composición nutricional de la misma, en este caso el contenido de hierro.

Por otra parte, Kass (1998) indica que la materia orgánica del suelo contribuye a la retención de cationes y comenta que en los suelos agrícolas constituye una fracción muy baja, por peso, comparada con la fracción mineral (ámbito normal 4.5 a 13% de la fracción mineral). Pero, debido a la mayor capacidad de intercambio de la materia orgánica, las fracciones minerales y orgánicas contribuyen por igual a mantener la CIC de muchos suelos. Este autor menciona que la CIC de la materia orgánica es muy importante en la retención de macro y micro nutrientes que pueden perderse del suelo por lixiviación.

Por su parte Briceño y Gadea (2002) mencionan que la materia orgánica posee una alta CIC que le permite fijar y retener cationes evitando su pérdida por lixiviación, afirman que es capaz de incorporar en su estructura compleja, micronutrientes como hierro, cobre y cinc, formando complejos órgano-metálicos llamados quelatos. En este sentido podría ser que la fracción de hierro soluble al ser mayor en el entisol (Fig. 32), a pesar de poseer este suelo menor cantidad de materia orgánica que el ultisol, de alguna forma la poca materia orgánica presente está quelatando o acomplejando una parte importante de este hierro soluble con el que entra en contacto y de esta forma le permite tener mayor cantidad de hierro asociado a la fracción orgánica que el ultisol.

Serrano y Adams (2000) encontraron valores de hierro asociados a la fracción orgánica en suelos ácidos de Venezuela desde 2.33 hasta 10.83 $\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$. Por su parte Peña (2004) en suelos sobre serpentinitas en Galicia, España encontró valores de hierro asociados a la fracción orgánica desde 265 hasta 3356 $\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$, lo cual evidencia la importancia de esta fracción como fuente de este elemento así como el amplio rango de valores de Fe que se pueden encontrar asociado a la fracción orgánica en los suelos.

5.3.5 Hierro de cambio

El hierro de cambio se obtuvo del desplazamiento de los iones del complejo de cambio del suelo con una solución saturada de acetato de amonio (se saturó el suelo con el ión amonio) y luego se leyó la cantidad de Fe que se desplazó de la muestra de suelo.

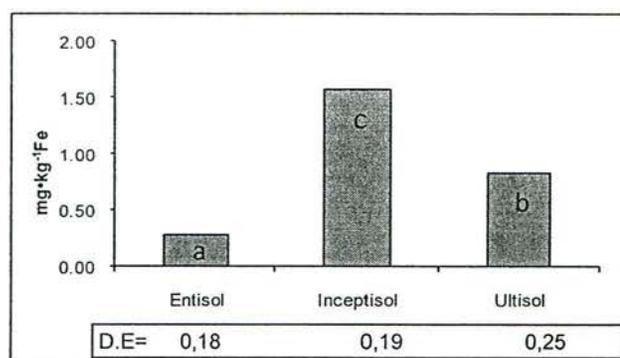


Figura 31. Hierro de cambio en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

El figura 31 muestra que el inceptisol presenta la mayor cantidad de hierro asociada a la fracción de cambio con 1.57 $\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$, seguido del ultisol con 0.83 $\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ y por último el entisol con solo 0.28 $\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$.

A pesar de la mayor cantidad de arcilla del suelo ultisol (Fig. 26) y la importante superficie específica de esta en el intercambio catiónico, los datos sugieren que la mayor CICE del suelo inceptisol $p<0.05$, sobre el entisol y el ultisol, favorecen que el hierro de cambio sea significativamente mayor en este suelo, por ser más reciente y menos lavado que el ultisol y tener más superficie específica que el entisol dadas sus diferencias en contenidos de arcilla.

Por otra parte aunque no existen diferencias significativas entre la CICE del suelo ultisol y la CICE del entisol (Cuadro 5), posiblemente si exista entre estos suelos una influencia del contenido de arcilla, la cual favorece al ultisol (Fig. 26) por tener una mayor superficie específica y aunado a su mayor reserva de hierro residual, justificaría la mayor cantidad de hierro de cambio de éste con respecto al entisol (Cuadro 6).

5.3.6 Hierro soluble

La figura 32 muestra que la fracción de hierro soluble es significativamente mayor en el suelo entisol con respecto al inceptisol y ultisol los cuales no muestran diferencias significativas entre ellos.

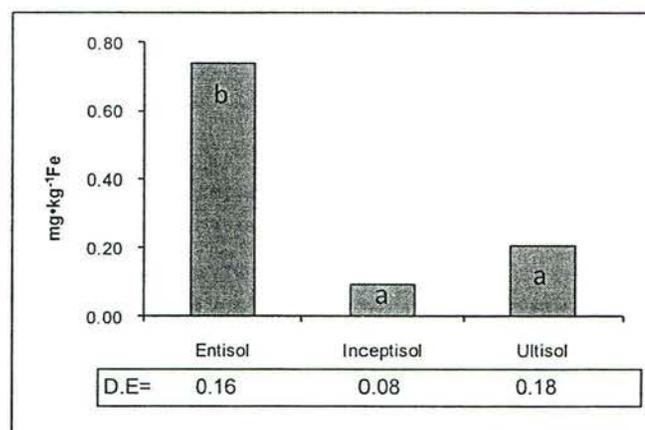


Figura 32. Hierro soluble en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

En finca Agrícola Industrial San Cayetano (suelo entisol), el Río Sucio se ha movido por toda el área (Fig. 7), provocando el arrastre de arenas de origen volcánico altas en hierro (MINAE 1982, Tournon y Alvarado 1997, Denyer y Kussmaul 2000).

Por otra parte el cultivo de piña al ser muy susceptible a la humedad y al estar en este lugar el nivel freático muy superficial e influenciado por el mismo Río Sucio, ha hecho necesario el uso de drenajes profundos (1.50 – 2 m) para poder cultivar la piña, lo cual provoca que en verano (enero – inicios de mayo), las plantaciones sufran deficiencias de agua, máxime la

escaza agua disponible de este suelo (Cuadro 5) y en consecuencia el hierro pase de un estado reducido a uno oxidado.

Lo anterior podría explicar los mayores contenidos de la forma de hierro soluble (Fig. 32) en el suelo de esta finca con respecto a los otros, ya que su menor contenido de arcilla (Fig. 26) y por ende menor superficie específica y menor capacidad de cambio, hace posible que los diferentes cationes (entre estos el Fe) presentes en la solución de suelo sean dispersados y solubilizados con facilidad en agua, y puede ser la razón junto a la génesis y geomorfología del suelo de la mayor cantidad de la fracción soluble de hierro en el entisol.

Los valores de hierro soluble son muy variables en los suelos y su concentración depende de múltiples factores, Peña (2004) en suelos sobre serpentinitas en Galicia, España encontró contenidos de hierro soluble desde 0 hasta 43 ppm, este último muy superior a los encontrados en este estudio.

5.3.7 Hierro biodisponible

La figura 33 muestra que el suelo entisol presentó la mayor cantidad de hierro biodisponible, con $450 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$, por su parte los suelos inceptisol y ultisol no presentaron diferencias estadísticas entre ellos con 67 y $40 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ de hierro biodisponible respectivamente (cuadro 6).

Estos resultados con esta fracción aunado a la fracción de hierro soluble (Fig. 32) ratifican que el suelo entisol posee hierro en un estado más fácilmente disponible para las plantas que los suelos inceptisol y ultisol.

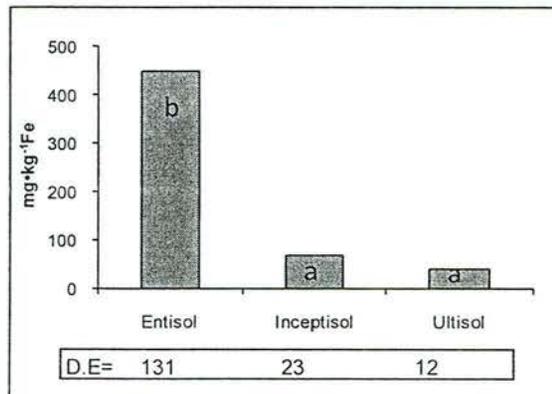


Figura 33. Hierro biodisponible en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Ahora bien el hierro biodisponible en el entisol es más de 440 veces mayor que el hierro soluble más el hierro de cambio en este suelo, por lo tanto, hay otra fracción de hierro que está participando activamente en el aporte de hierro a las plantas (biodisponibilidad), esta fracción podría ser la asociada a la materia orgánica, pues aunque por cantidad o concentración podría ser también las formas de hierro asociada a óxidos cristalinos u óxidos amorfos (Fig. 27 y 28) estas son formas menos solubles y por ende menos biodisponibles que la fracción orgánica, y aunque posiblemente algo de esta fracción participa en la fracción biodisponible es quizás la fracción orgánica la más importante en cuanto a biodisponibilidad se refiere en este suelo y genera otra evidencia adicional sobre la naturaleza y composición de la materia orgánica en el entisol (alta en hierro).

Por otra parte, podría surgir el argumento si la energía de quelatación del DTPA usado en la extracción, estaría influyendo de forma tal que extraiga hierro asociado a otras formas y no solo a la materia orgánica y a las formas solubles. Los resultados descartan esta hipótesis, por dos razones principales, la primera es que el DTPA utilizado es el mismo en todos los suelos, la segunda es que si la energía de quelatación fuera demasiado alta y por ende capaz de extraer hierro de formas no solubles (asociada a óxidos amorfos, óxidos cristalinos o residual), el suelo que debería presentar los menores contenidos de Fe extraído con DTPA

debería ser el entisol, puesto que es el suelo con el menor contenido de estas fracciones (Cuadro 6).

Lo anterior se cumple también en el suelo inceptisol y el ultisol, puesto que el hierro biodisponible es aproximadamente 40 veces superior al hierro asociado a las formas soluble y de cambio en cada uno, de manera que el hierro asociado a la materia orgánica es capaz de suplir la cantidad determinada en la forma biodisponible es decir 67 y 40 mg • Kg⁻¹ de hierro biodisponible respectivamente, ya que la forma asociada a la materia orgánica determinada en el ultisol y en el inceptisol alcanza valores de 815 y 5331 mg • Kg⁻¹ respectivamente (Cuadro 6).

Debido a lo anterior, pareciera que la fracción de hierro asociado a la materia orgánica es muy importante en la biodisponibilidad de este elemento para el cultivo de la piña y además justifica la importancia de considerar el contenido de materia orgánica de los suelos bajo cultivo de piña como un componente adicional de los programas de nutrición y conservación de suelos en este cultivo.

5.3.8 Hierro residual

El hierro residual de acuerdo a la metodología utilizada correspondió con un cálculo donde se restan al hierro total, cada una de las demás fracciones, excepto la de hierro biodisponible que corresponde con una fracción independiente en el proceso de fraccionamiento propiamente dicho.

La figura 34, muestra que el hierro residual fue significativamente diferente en los tres órdenes de suelos, es importante recalcar que la fracción residual junto con la de hierro asociado a óxidos cristalinos, son las formas dominantes en todos los suelos en cuanto a cantidad de hierro, pues juntas representan más de 80% del hierro en el inceptisol y más de 90% en los suelos entisol y ultisol (Cuadro 6).

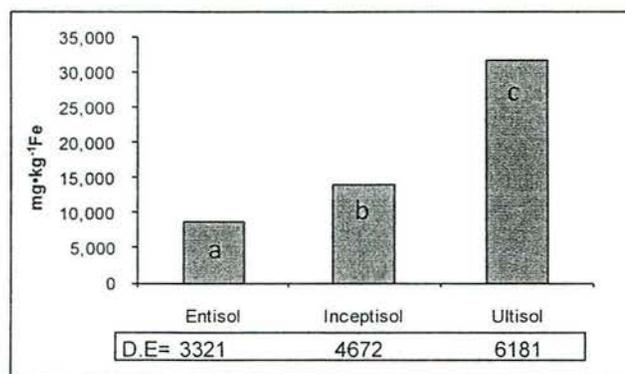


Figura 34. Hierro residual en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Sin embargo, una diferencia entre estos se da en el aporte de cada forma al total de hierro, ya que en el entisol y el inceptisol la fracción de hierro asociada a óxidos cristalinos aporta más de 50% del contenido total de hierro en estos suelos, mientras que en el ultisol, es la forma residual la responsable de 57% del hierro total, por su parte la fracción asociada a óxidos cristalinos no alcanza 35% (Cuadro 6).

Lo anterior posiblemente se debe a la génesis de cada suelo, pues el entisol como se mencionó anteriormente, es un suelo más reciente, menos meteorizado y aunado a su textura dominada por la fracción de arena, provoca que el aporte de Fe asociado a silicatos primarios (fracción residual) sea significativamente menor, tal como lo muestra la figura 34.

Por su parte, el inceptisol a pesar de presentar mayor cantidad de arcilla que el entisol, no alcanza los niveles de hierro residual que tiene ultisol, porque la fracción de arcilla todavía es menor (Fig. 26) como por su menor meteorización y contenido de materiales de otros orígenes (aluviales y volcánicos), de acuerdo a la estratigrafía de Denyer y Kussmaul (2000) y el geomorfismo de SEPSA (1980c). Estos posiblemente, en este suelo son los responsables del mayor contenido de hierro asociado a los óxidos cristalinos en comparación al hierro residual. En este sentido, Fassbender y Bornemisza (1987) señalan que la meteorización cambia la proporción en que están presentes los minerales en los suelos e indican que aquellos resistentes a la meteorización se acumulan gradualmente; por

ejemplo el cuarzo, algunos óxidos de hierro y aluminio y la ortoclasa. Los autores afirman que esta acumulación es más importante en las fracciones de arena y limo, ya que en las arcillas predominan los minerales secundarios formados en el transcurso de la meteorización.

Estos autores agregan que es sabido que los suelos más antiguos no tienen minerales primarios debido al prolongado proceso de meteorización, lo cual puede ser la razón de la significativa menor cantidad de hierro asociado a óxidos cristalinos en el ultisol y la consecuente mayor cantidad de estos en el entisol e inceptisol.

Investigadores como Serrano y Adams (2000) encontraron valores de hierro residual en suelos ácidos de Venezuela desde 2600 hasta 19600 mg • Kg⁻¹, mientras que Peña (2004) en suelos sobre serpentinitas en Galicia, España encontró valores que van desde 5 hasta 33800 mg • Kg⁻¹, lo cual demuestra la variabilidad de los suelos en esta fracción dependiendo del origen de los materiales formadores del mismo.

5.4 Relación entre biodisponibilidad de hierro con actividad microbiana y variables bioquímicas

De las variables bioquímicas y microbiológicas estudiadas (Cuadro 7), únicamente se encontró significancia estadística ($p < 0.05$) entre la biodisponibilidad de hierro y el índice de mineralización. Sin embargo desde el punto de vista agronómico no se encontró relación, pues la (Fig. 35) sugiere un aumento en el hierro biodisponible al aumentar el índice de mineralización.

Sin embargo, son los altos valores de esta fracción en el entisol (Fig. 33), los responsables de la tendencia en la (Fig. 35) debido a que los valores son muy diferentes entre órdenes de suelos, pues al analizar la tendencia del índice de mineralización sobre la biodisponibilidad de hierro en los órdenes de suelo por separado se encuentra el efecto contrario (Fig. 36).

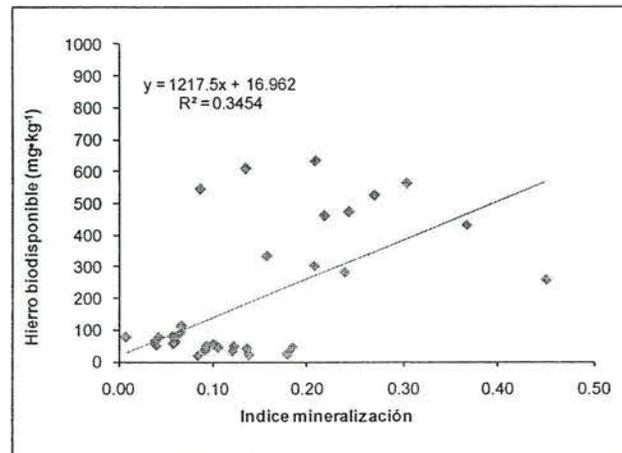


Figura 35. Relación entre el hierro biodisponible y el índice de mineralización. Statistica, 2D Scatterplot ($p < 0.05$).

Lo anterior posiblemente se debe a la mayor influencia de las propiedades físicas y químicas propias de cada orden de suelo, como por ejemplo, los resultados encontrados con la materia orgánica y la influencia del contenido de arcilla sobre las concentraciones de hierro en las diferentes fracciones, que al efecto bioquímico sugerido por el índice de mineralización, lo cual podría ser la razón por la que ninguna de las otras variables bioquímicas y microbiológicas presentó relación estadística con la biodisponibilidad de hierro.

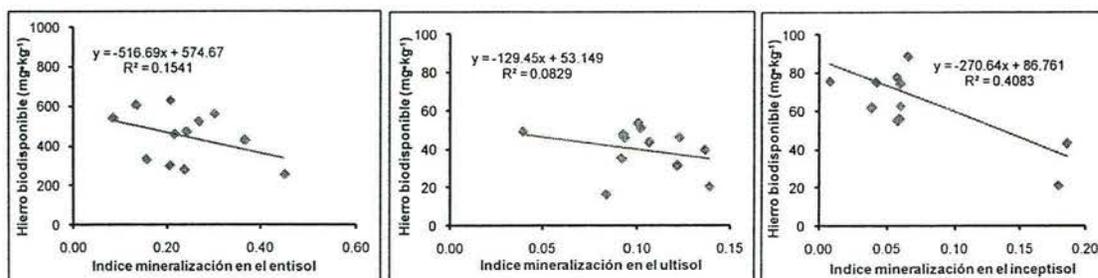


Figura 36. Relación entre hierro biodisponible e índice de mineralización por orden de suelo.

Es importante indicar que la única variable microbiológica que presentó diferencia estadística entre los órdenes de suelo fue precisamente el índice de mineralización, pero esto, posiblemente debido a que dicho índice considera para su estimación el porcentaje de materia orgánica, que como ya se mencionó anteriormente presentó diferencias significativas entre los órdenes de suelo.

Cuadro 7. Comportamiento de variables bioquímicas y microbiológicas en los órdenes de suelo estudiados (valores promedio de 12 unidades experimentales por orden de suelo). Junio 2008.

Variable	Entisol	Inceptisol	Ultisol
Materia orgánica (%)	0.89 ± 0.31	3.92 ± 1.31	1.76 ± 0.38
Respiración (g C-CO ₂ •100g ⁻¹)	0.19 ± 0.07	0.23 ± 0.07	0.18 ± 0.05
Índice de mineralización	0.24 ± 0.10	0.07 ± 0.05	0.10 ± 0.03
Actividad catalasa (mmoles H ₂ O/g•suelo•h ⁻¹)	0.18 ± 0.10	1.60 ± 0.64	3.82 ± 0.89
Bacterias aeróbicas (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	6.30 ± 0.98	6.73 ± 0.44	6.81 ± 0.35
Bacterias anaeróbicas (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	3.17 ± 0.34	3.52 ± 0.51	3.33 ± 0.45
Hongos (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	4.04 ± 0.2	3.88 ± 0.22	3.81 ± 0.4
Levaduras (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	4.05 ± 0.38	4.01 ± 0.50	4.24 ± 0.19
Población microbiana total (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	6.39 ± 0.73	6.73 ± 0.43	6.81 ± 0.34

En el caso de las variables bioquímicas la única que presentó diferencia estadística $p < 0.05$ entre los órdenes de suelo fue la actividad catalasa. Sin embargo, García *et al.* (2003) mencionan, siempre que se determine la actividad catalasa a través de la descomposición del H₂O₂, entre 5% y 65% de la actividad total que se determina puede ser debida a catálisis no enzimática, atribuible a compuestos inorgánicos de Fe y Mn, lo cual, (dados los contenidos de Mn Cuadro 8, específicamente en el ultisol), concuerda más con las afirmaciones de García *et al.* (2003) referente a la catálisis no enzimática que a la actividad catalasa per se. Por esta razón, para estas condiciones de suelo (altos contenidos de hierro y manganeso), pueden ser más apropiadas las técnicas empleadas por Trasar *et al.* (2000), cuya determinación es más directa.

Estos resultados, con excepción de los contenidos de materia orgánica cuyo efecto se discute en la relación de los contenidos de hierro en la hoja D y las distintas fracciones del elemento, muestran que no existe respuesta en la biodisponibilidad del hierro y las variables bioquímicas y microbiológicas estudiadas.

Cuadro 8. Contenido de manganeso (Olsen modificado) en los suelos estudiados (mg•kg⁻¹).

ESTADÍSTICO	ORDEN DE SUELO		
	ULTISOL	ENTISOL	INCEPTISOL
Ámbito	113 – 275	2.00 – 13.00	34 – 93
Promedio	180.33	7.00	57.42
D.E	42.76	3.05	17.26
N	12	12	12

5.5 Relación entre contenido de hierro en hoja D y actividad microbiana

No se encontró significancia estadísticas entre el contenido de hierro en la hoja D, en ninguna de sus secciones (apical, media y basal), con ninguno de los parámetros de actividad microbiana.

Pese ello, es importante presentar los resultados de estas variables (Cuadro 9), en los cuales se puede observar que los valores encontrados en esta investigación fueron muy bajos. En (cuadro 7) se reportan los mismos parámetros categorizados por orden de suelo.

Cuadro 9. Contenido de materia orgánica y actividad microbiana en los suelos estudiados.

Parámetro	Valor medio órdenes de suelos cultivados con piña	Valores de referencia suelos agrícolas *
Materia orgánica (%)	2.19 ± 1.51	> 4.25
Respiración (g C-CO ₂ •100g ⁻¹)	0.20 ± 0.07	15 - 32
Índice de mineralización	0.14 ± 0.10	0.30 - 1.20
Actividad catalasa (mmoles H ₂ O/g•suelo•h ⁻¹)	1.87 ± 1.64	1.62 - 2.20
Bacterias aeróbicas (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	6.61 ± 0.67	mínimo 6
Bacterias anaeróbicas (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	3.34 ± 0.45	máximo 4
Hongos (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	3.91 ± 0.29	mínimo 3
Levaduras (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	4.10 ± 0.38	máximo 4
Población microbiana total (Log u.f.c•g suelo ⁻¹)	6.65 ± 0.54	8

*Autores: Atlas y Bartha (2002), García *et al.* (2003), Rosales *et al.* (2008), Obregón y Mata (2008).

Al comparar los resultados encontrados de las variables bioquímicas y microbiológicas en los diferentes suelos con los reportados para suelos agrícolas por diferentes investigadores (Cuadro 9), en términos generales se puede notar que son bajos, por esta razón se considera necesario realizar más investigación referente a variables bioquímicas y microbiológicas a la vez que se promueven diferentes alternativas de conservación y mejoramiento del suelo cultivado con piña, como por ejemplo: uso de materia orgánica en suelos deficientes, mejorar las tecnologías y procesos de eliminación de la plantación en cada nuevo ciclo de cultivo (eliminar las quemas, uso de microorganismos

descomponedores de materia orgánica e incorporación de rastrojos) y otras orientadas al aumento de la riqueza y actividad microbiológica de los suelos bajo este cultivo.

5.6 Relación entre contenido de hierro en hoja D y fracciones del elemento en el suelo

Los resultados más relevantes en cuanto a la relación del contenido de hierro en la hoja D y las distintas fracciones del elemento en el suelo, son las expresadas en el tercio basal de la hoja D y las fracciones asimilables (Fe soluble y Fe de cambio). Sin embargo, únicamente se presentó significancia estadística cuando se consideró la relación Fe/Mn y Mn/Fe a nivel foliar con las fracciones mencionadas, lo cual concuerda con afirmaciones de Py *et al.* (1987); estos investigadores aseguran en cuanto a niveles nutricionales de Fe y Mn en el cultivo de piña, que es más importante la relación entre ellos, que sus contenidos por separado y sugiere los valores del Cuadro 10, para analizar suficiencia y/o insuficiencia nutricional de estos elementos en la planta de piña.

Cuadro 10. Relaciones entre Fe y Mn en la hoja D, Marchal (1971) citado por Py *et al.* (1987), en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ms}$.

Observaciones	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Mn}$	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Fe}$	Fe/Mn
Deficiencia de Mn con síntomas	29 – 78	500 – 863	Sobre 10.5
Riesgo de deficiencias de Mn sin síntomas	53 – 130	280 – 1008	Entre 4 – 10.5
Sin Síntomas	38 – 700	50 – 590	Entre 0.4 – 4
Deficiencia de Fe con síntomas	190 – 1300	60 – 475	Bajo 0.4

La figura 37 muestra la relación existente entre el hierro soluble y la relación Fe/Mn a nivel foliar, esta sugiere que por cada aumento de 0,9167 ppm de Fe soluble en el suelo, la relación Fe/Mn aumenta 1 unidad a nivel foliar.

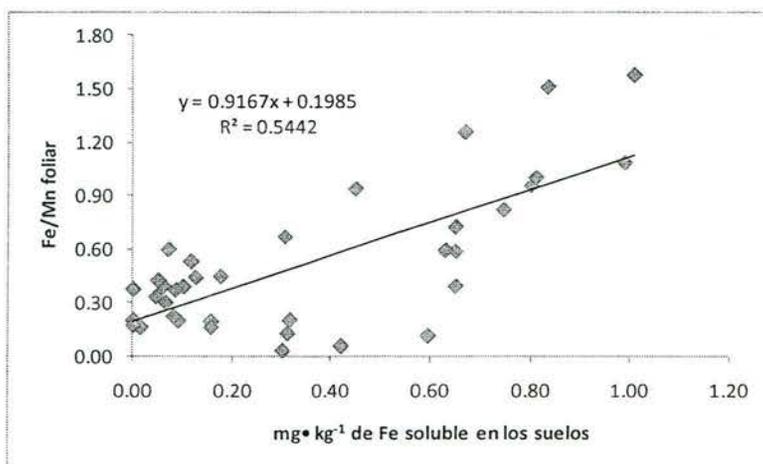


Figura 37. Relación entre el Fe/Mn en el tercio basal de la hoja D y el Fe soluble en el suelo Statistica, 2D Scatterplot ($p < 0.05$).

Este resultado es agronómicamente importante, pues de acuerdo con los valores de Py *et al.* (1987) del cuadro 10, no se presenta deficiencia de Fe entre 0.4 – 4 de la relación Fe/Mn, lo cual sugiere que el empleo de técnicas orientadas a favorecer la fracción de Fe soluble a nivel de suelo podría compensar los requerimientos de este elemento al regular la relación Fe/Mn en suelos con altos contenidos de manganeso.

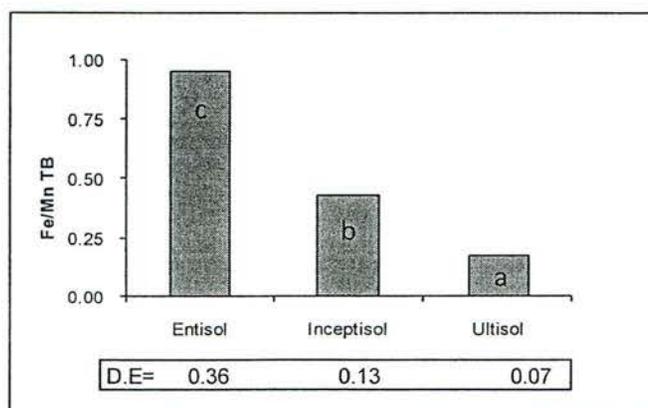


Figura 38. Relación foliar Fe/Mn en tercio basal de la hoja D en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha = 0.05$).

Por otra parte en términos generales, el suelo entisol e inceptisol están por encima del rango de suficiencia de la relación foliar Fe/Mn con 0.95 y 0.43 respectivamente, mientras el ultisol está por debajo ya que presentó solamente 0.17 (Fig. 38). Lo anterior

concuera con los contenidos de Mn encontrados en los suelos (Cuadro 8), donde se evidencia que el suelo ultisol de acuerdo con Bertsch (1998) presenta contenidos altos de manganeso, seguido del inceptisol con un contenido normal y por último el entisol con un contenido bajo de este elemento.

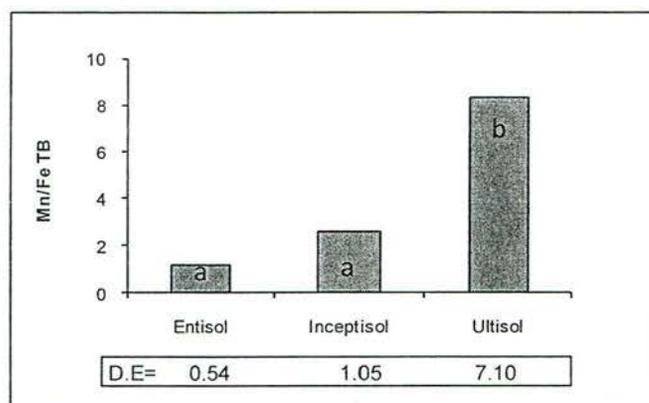


Figura 39. Relación foliar Mn/Fe en tercio basal de la hoja D en tres órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Por su parte, el contenido de hierro de cambio en el suelo presentó significancia estadística con la relación Mn/Fe foliar en el tercio basal. Al igual que la fracción anterior esta es considerada como asimilable para las plantas Serrano y Adams (2000). De acuerdo al cuadro 10 sugerido por Py *et al.* (1987), para el análisis de suficiencia de la relación Fe/Mn a nivel foliar, a pesar de los bajos contenidos de Mn (Cuadro 8) en el entisol, la relación Mn/Fe es superior a 1, por lo tanto está sobre el rango de suficiencia y sin diferencia estadística con el inceptisol (Fig. 39), mientras que el suelo ultisol presenta una alta relación Mn/Fe, lo cual puede repercutir de acuerdo con Py *et al.* (1987) en deficiencias de Fe, sin embargo este tema se discute más en detalle en el apartado de efecto de aspersiones con sulfato de hierro sobre el contenido de hierro en la planta de piña.

Al considerarse la fracción de Fe asociada a la materia orgánica potencialmente asimilable, Serrano y Adams (2000), podría ser que esta fracción esté favoreciendo

durante su mineralización las fracciones asimilables (Fe soluble y Fe de cambio), principalmente en el entisol e inceptisol. Los resultados encontrados en el entisol y comentado en el apartado de la fracción de hierro asociado a la materia orgánica podría ser evidencia de esto, pues el entisol posee menor cantidad de materia orgánica que el ultisol por ejemplo. Sin embargo, presenta mayor contenido de Fe asociado a esta fracción que el ultisol, y además el hierro soluble es mayor en el entisol, a pesar de presentar menor cantidad de hierro total, residual, asociado a óxidos cristalinos y amorfos que el ultisol, por ser consideradas estas fracciones como menos solubles y por ende menos disponibles (Fassbender y Bornemisza 1987, Serrano y Adams 2000).

Por su parte el inceptisol presenta mayor cantidad de materia orgánica (Cuadro 5). Por consiguiente, el hierro asociado a esta fracción es mayor (Fig. 29). Adicionalmente, su mayor cantidad de arcilla con respecto al entisol (Fig. 26) favorece la mayor cantidad de hierro de cambio con respecto a este suelo, y aunque presenta menor contenido de arcilla que el ultisol, posiblemente el mayor contenido de materia orgánica favorece la fracción de cambio como lo indican Nuñez (1992), Kass (1998), Bertsch (1998), Peña (2004), entre otros.

5.7 Efecto de aspersiones con sulfato de hierro sobre el contenido de Fe en hoja D

En cuanto al efecto del tratamiento sobre los contenidos de hierro en la hoja D de plantas de piña se realizó el ANOVA para las tres secciones de la hoja. En la sección apical el análisis no mostró respuesta del tratamiento (Fig. 40), ni tampoco en la interacción (orden x tratamiento), sin embargo si hubo diferencias estadísticas entre órdenes de suelo (Fig. 41).

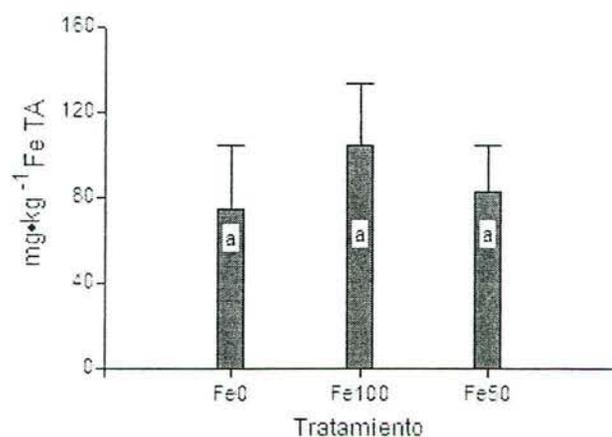


Figura 40. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio apical de la hoja D en los diferentes tratamientos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.

Por otra parte en lo que respecta a los resultados en el tercio medio de la hoja D, el ANOVA indica que no existe respuesta en el tratamiento (Fig. 42), sin embargo en la figura 44 establece significancia estadística en la interacción (orden x tratamiento).

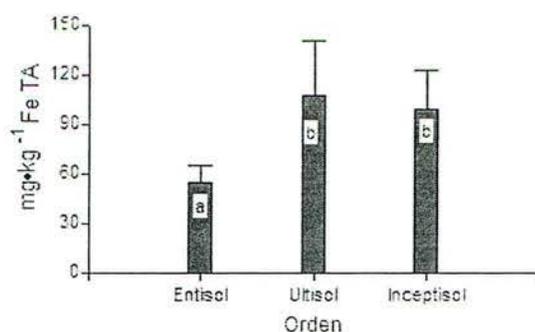


Figura 41. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio apical de la hoja D en los diferentes órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.

La razón por la que no se encontró diferencia estadística en el tratamiento para la sección media y apical de la hoja D, posiblemente se deba a los amplios intervalos de confianza (barras verticales muy largas Figs. 40 y 42), producto de una elevada desviación estándar. Esta alta variabilidad se debe a que el tercio apical y el tercio medio de la hoja D, son menos constantes que el tercio basal, para reflejar el contenido nutricional de Fe, lo cual se verá

más adelante. En términos generales el tercio apical presentó más variabilidad que el tercio medio y este presentó mayor variabilidad que el tercio basal.

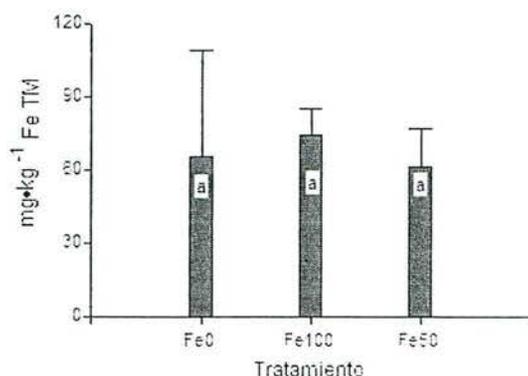


Figura 42. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio medio de la hoja D en los diferentes tratamientos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.

Es importante notar que a pesar de las diferencias en sensibilidad que puedan tener las tres secciones de la hoja D para reflejar cambios en la composición nutricional debido a la aplicación de los tratamientos, en todos los casos fueron sensibles a las diferencias propias de los órdenes de suelo (Figs. 41 y 43), por lo que este hecho podría considerarse un efecto adicional de la influencia de las propiedades inherentes a cada orden de suelo a la vez que reafirma la activa participación del sistema radical de este cultivo en la absorción de nutrientes.

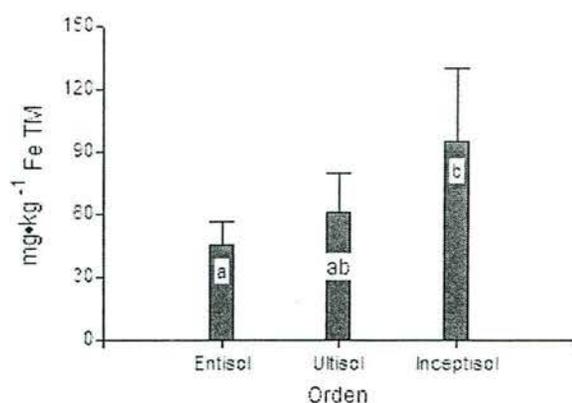


Figura 43. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio medio de la hoja D en los diferentes órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.

Debido a que en el análisis bifactorial sobre el tercio medio de la hoja D, el ANOVA indicó significancia estadística para la interacción (orden x tratamiento), únicamente es válida la comparación de la interacción (Fig. 44) y no la de factores por separado, aunque estos se expusieron para compararla y poder demostrar la mayor sensibilidad que tiene el tercio basal de la hoja D, para expresar cambios en el contenido nutricional producto de la aplicación de los tratamientos.

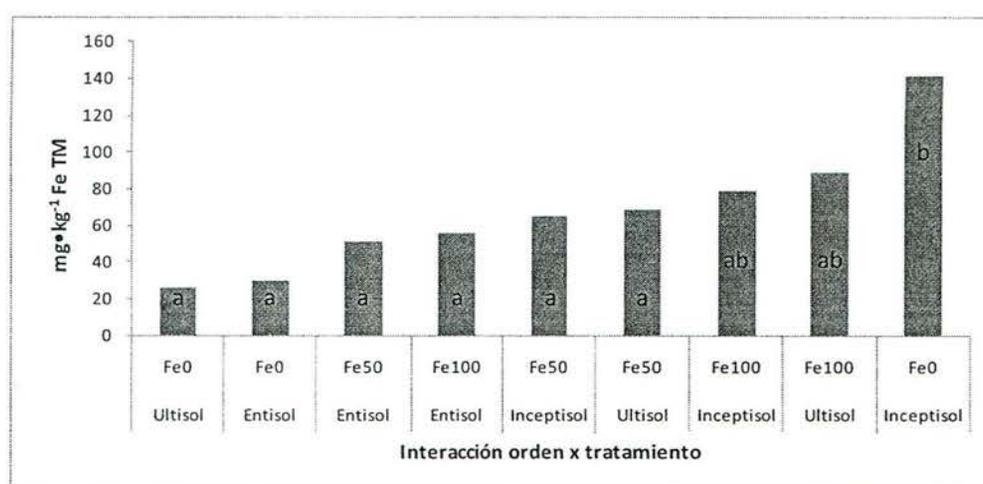


Figura 44. Interacción orden x tratamiento en el contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en tercio medio de la hoja D (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

La figura 44 muestra que en la interacción (orden x tratamiento) del tercio medio de la hoja D, la diferencia de medias se presenta únicamente entre el tratamiento Fe0 del inceptisol y seis de los 9 tratamientos de la interacción.

Es importante notar que el Fe0 del inceptisol fue diferente al Fe0 del ultisol y al Fe0 del entisol; esta diferencia evidentemente no corresponde con una desigualdad producto del tratamiento, puesto que en ninguno de los casos se suministró hierro y demuestra lo comentado en los acápite del fraccionamiento del hierro y los mayores contenidos de las formas asimilables y potencialmente asimilables (específicamente la de cambio y la asociada a la materia orgánica) del inceptisol sobre los otros órdenes.

Esta misma diferencia es aún notoria con el Fe50 del entisol y Fe50 del ultisol; lo cual consecuentemente confirma la afirmación del punto anterior, puesto que el tratamiento Fe0 del inceptisol sin suministro de hierro superó significativamente los contenidos foliares del entisol y ultisol a los que se aplicó 6,67 kg/ha de hierro. Lo cual evidencia la importante influencia de las formas asimilables y potencialmente asimilables de Fe en este suelo y la absorción por la planta.

Por último; el hecho que el tratamiento de 0 kg de aplicación de Fe en el inceptisol superó el contenido foliar del elemento en el tratamiento con 6,67 kg/ha de Fe en este mismo suelo, podría deberse a las diferencias en sensibilidad del tercio medio de la hoja D, como se ha indicado anteriormente y a la mayor desviación estándar de este tratamiento con respecto a los otros, lo cual se refleja en el intervalo de confianza de dicha interacción (Fig. 45), donde un valor muy alto de una unidad experimental de este tratamiento podría estar provocando que la media general se desfase demasiado. Este mismo hecho podría ser la razón de la diferencia con el tratamiento Fe100 en el entisol y que no existan diferencias estadísticas con los otros tratamientos con 13.34 kg/ha de hierro.

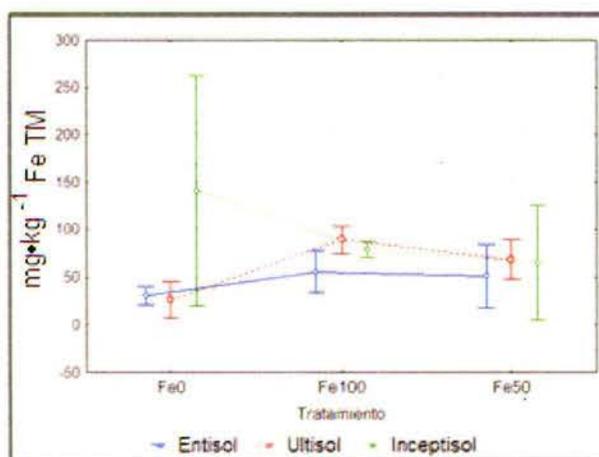


Figura 45. Interacción orden x tratamiento sobre contenido foliar de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio medio de la hoja D, las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.

En términos generales se considera que los resultados en los contenidos nutricionales del tercio basal de la hoja D, son de mejor claridad y mayor importancia agronómica, por las siguientes razones:

1. El ANOVA determinó significancia estadística $p < 0.05$ para el factor orden de suelo y el factor tratamiento, no así para la interacción, lo cual respalda lo discutido anteriormente, sobre la mayor influencia de las propiedades físicas y químicas del suelo en comparación al suministro foliar de hierro, debido a que si un suelo posee cantidades suficientes para satisfacer los requerimientos del cultivo de piña el mismo no tendrá respuesta al suministro del nutriente (Henríquez *et al.* 1998).
2. Los resultados encontrados en cuanto a los tratamientos (Fig. 46) indican que para las condiciones de los órdenes de suelo estudiados no existe diferencias estadísticas entre el suministro foliar de 6,67 kg/ha de Fe y el suministro de 13,34 kg/ha de Fe, sin embargo si existe diferencia estadística entre el no suministro de hierro y el suministro de 13,34 kg/ha del elemento.

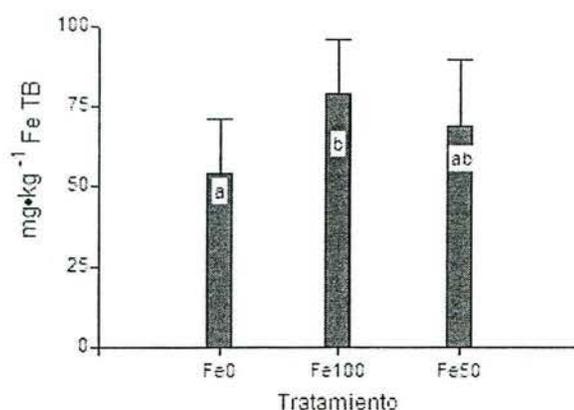


Figura 46. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio basal de la hoja D en los diferentes tratamientos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.

Esto sugiere una mayor sensibilidad del tercio basal de la hoja D para analizar respuesta en contenido nutricional de Fe en este cultivo, puesto que esto no fue posible notarlo en el tercio apical ni en el tercio medio.

Ahora bien, al analizar las diferencias del factor orden de suelo (Fig. 47), se observa que no existe diferencia estadística entre el ultisol y el entisol, y adicionalmente en ambos suelos los contenidos de Fe en el tercio basal son menores al contenido de Fe en el tercio basal del suelo inceptisol. Nuevamente se encuentra el posible efecto que tienen las fracciones asimilables y potencialmente asimilables (hierro de cambio y hierro asociado a la materia orgánica), el cual en ambos casos es significativamente superior en el inceptisol con respecto a los otros dos órdenes, como se analizó en las figuras 29 y 31 en sus respectivos acápite.

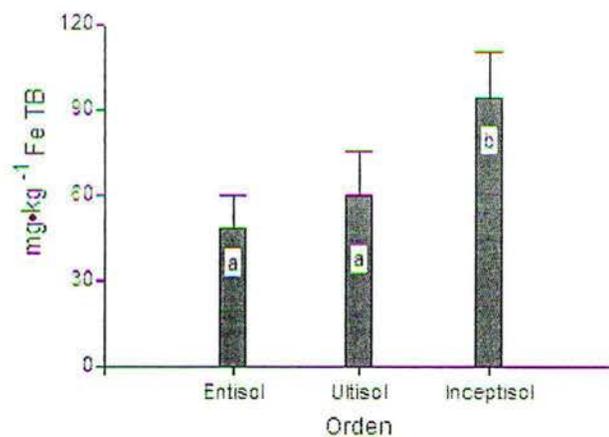


Figura 47. Contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio basal de la hoja D en los diferentes órdenes de suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$). Las barras verticales muestran un intervalo de confianza de 95%.

Por otra parte aunque el ANOVA no presentó significancia estadística para la interacción (orden x tratamiento), los datos son valiosos para analizar algunas otras consideraciones importantes referentes a las condiciones de suelo específicamente de propiedades físicas que pueden ayudar a dilucidar algunas situaciones hasta ahora no abordadas. Por ejemplo, por qué, si el suelo entisol presentó la mayor cantidad de hierro biodisponible, es la condición con los valores más bajos de hierro en el tercio basal de la hoja D (Fig. 47).

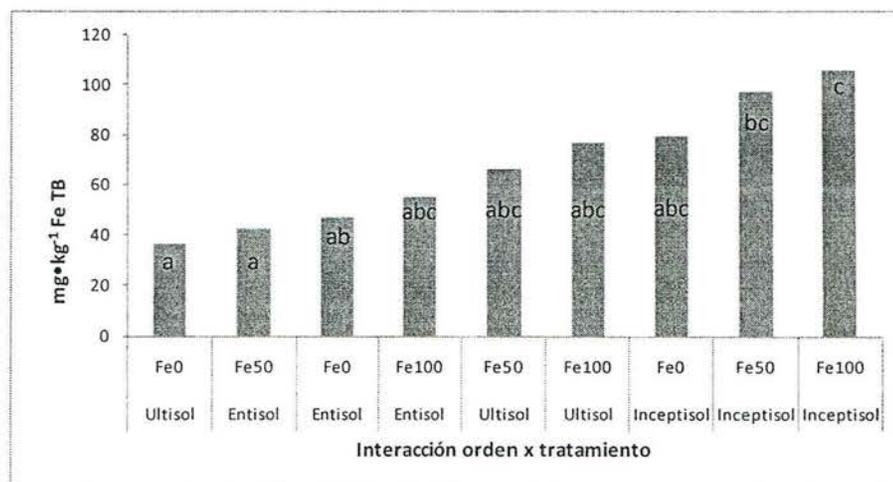


Figura 48. Interacción orden x tratamiento en el contenido de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en tercio basal de la hoja D (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Las diferencias estadísticas en la interacción orden x tratamiento (Fig. 48) de los contenidos de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio basal de la hoja D, muestra que existe diferencia entre el Inceptisol a $13,34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Fe con el ultisol y entisol sin aporte de hierro y el entisol con $6,67 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de hierro. Estos son datos más válidos desde el punto de vista agronómico que los encontrados con la interacción de los contenidos de Fe en el tercio medio y en general con los valores de Fe obtenidos en el tercio apical de la hoja D, lo que demuestra la mayor precisión agronómica del tercio basal de la hoja D para analizar contenido nutricional de hierro en este cultivo.

Dado que el inceptisol es un suelo que presenta significativas fracciones de hierro asimilables y potencialmente asimilables (Fig. 29 y Fig. 31) que aunadas al mayor aporte de hierro foliar ($13,34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) es de esperar contenidos altos de hierro a nivel foliar, esta posiblemente es la razón por la que supera estadísticamente los valores de hierro ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tercio basal de la hoja D en los suelos ultisol y entisol sin aporte de hierro foliar y al entisol a $6,67 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Fe.

Posiblemente la misma razón anterior justifica las diferencias del inceptisol a $6,67 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Fe, cuyos contenidos de Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) foliar en el tercio basal superan los contenidos del

suelo ultisol sin suministro de hierro y al entisol a la misma dosis, es decir $6,67 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de hierro.

Entre los demás tratamientos no se encontraron diferencias estadísticas, lo que significa como se observa en la Fig. 48 que el inceptisol sin suministro de hierro fue estadísticamente igual al ultisol y entisol estos con aporte de $13,34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Fe, así mismo sin diferencias estadísticas entre estos órdenes y los tratamientos con 0 y $6,67 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de aporte de Fe foliar.

Ahora bien, la razón por la que el suelo entisol a pesar de tener significativamente más hierro biodisponible (Fig. 33) que los otros órdenes de suelo, presenta los contenidos más bajos de Fe foliar en el tercio basal (Fig. 47), posiblemente se deba a las propiedades físicas de este suelo (principalmente el agua disponible y su relación con la textura franco arenosa, cuadro 5), y la influencia de las condiciones climáticas imperantes durante la investigación (menor precipitación y mayor temperatura que en las otras fincas (Figs. 5, 8 y 11).

Por otra parte, aunque Py *et al.* (1987), Jiménez (1999), Bertsch (1999) y Bartholomew *et al.* (2002) entre otros, señalan que la piña es un cultivo tolerante a la acidez, dadas las características morfológicas que presentaron los sistemas radicales en los diferentes suelos y los datos de saturación de acidez del cuadro 5, quizás haga falta mayor información en esta vía y si exista una respuesta en la sanidad radical del cultivo a esta propiedad química del suelo. Esto se puede notar en la composición del sistema radical (Fig. 48).

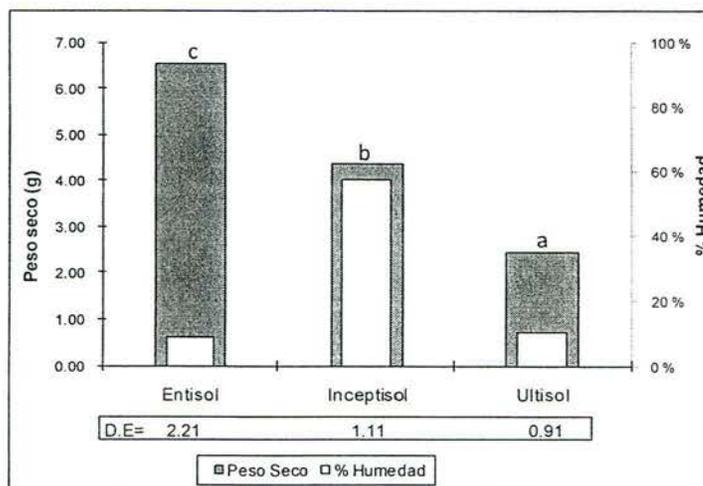


Figura 48. Peso seco (g) y contenido de humedad (%) de la raíz de plantas de piña en los diferentes suelos (letras iguales indican diferencias no significativas en la variable peso seco de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

El suelo entisol desarrolló un sistema radical más voluminoso que el de los otros suelos, sin embargo el contenido de humedad de este no llegó a 10%, la morfología de este sistema radical fue corchoso, en comparación con el inceptisol, el cual presentaba menor volumen y desarrollo que el sistema radical del entisol. Sin embargo, era de apariencia más succulenta. Por su parte el ultisol presentó un sistema radical menos voluminoso que los otros suelos, y un contenido de humedad bajo (menos de 10%). Adicionalmente, presentaba coloraciones rojizas alrededor de la raíz, similares a óxidos de Fe.

El mayor peso seco de la raíz que creció sobre el suelo entisol se debe probablemente a una mayor necesidad de explorar el suelo en busca de agua, dada la textura franco arenosa de este suelo y la condición de raíz suberizada se debe probablemente a la muerte del sistema radicular en un % importante (Fig. 50).

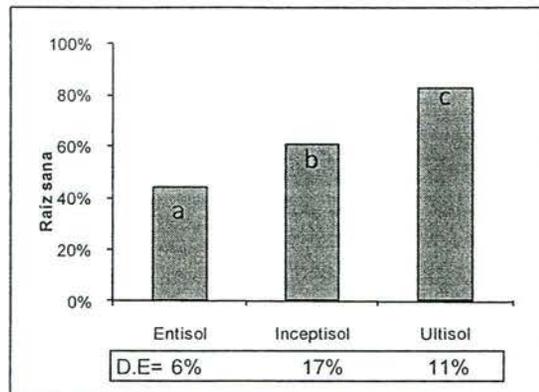


Figura 50. Porcentaje de raíz sana en plantas de piña en los diferentes suelos (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

La figura anterior muestra que la raíz más afectada mediante la segregación cualitativa que se realizó de sus partes fue precisamente la que creció en las condiciones del suelo entisol, le siguió la raíz del inceptisol con poco más del 60% de raíz sana, mientras que la raíz que creció sobre el ultisol presentó poco más de 80% de raíz sana. Esta situación podría explicarse debido a las diferencias en la precipitación durante la investigación (Fig. 51), ya que en el entisol hubo menor precipitación y sumado a su condición de suelo franco arenoso, no deja agua disponible al cultivo durante algunos intervalos de tiempo, lo cual afecta la sanidad del sistema radicular, en los otros suelos el efecto no es tan evidente debido a que la precipitación es mayor, los suelos son de textura menos liviana y por ende pueden tener mayor reservas de agua. Las diferencias entre estos suelos, como se mencionó anteriormente, quizás se deban a la resistencia a la penetración que puedan tener las raíces debido a la textura.

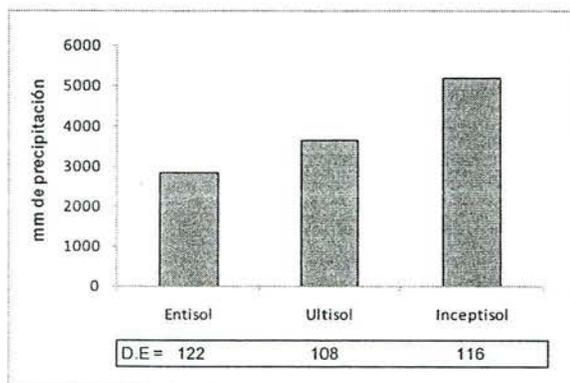


Figura 51. Precipitación acumulada durante la investigación en las tres condiciones de suelo.

Aunque Py *et al.* (1987) comenta que se logran buenas producciones con precipitaciones superiores a $1850 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ posiblemente la textura del suelo, sumada a la alta radiación solar (temperatura) de la zona donde se ubica el entisol (Fig. 9), contribuyeron a que el suelo presentara deficiencias hídricas y el sistema radical resultara afectado, lo cual posiblemente repercutió en la absorción de nutrimentos, en este caso el hierro, lo cual podría explicar el hecho que el suelo entisol a pesar de tener significativamente más hierro soluble (Fig. 32) y más hierro biodisponible (Fig. 33), no fuera el suelo con el cultivo de mayor contenido foliar a nivel del tercio basal de la hoja D (Fig. 47). Aunque es importante mencionar que esta situación no es constante en esta finca durante todo el año y en términos generales de las fincas de piña de BANACOL esta es la que presenta mayores contenidos foliares de este elemento⁵.

Por otra parte, el hecho que el suelo inceptisol presente un porcentaje relativamente bajo de raíz sana a pesar de tener condiciones aparentemente más favorables (precipitación y temperatura), posiblemente se deba a lo mencionado por investigadores como Taiz y Zeiger (2006), quienes indican que bajo condiciones donde se desarrollan microorganismos anaeróbicos (Fig. 52) que obtienen su energía de la reducción del nitrato (NO_3^-) a nitrito (NO_2^-) u óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno molecular (N_2), y a medida que las condiciones se

⁵ Estadísticas de análisis foliares de esta finca muestran que el contenido de Fe en el tercio basal de la hoja D supera 100 ppm de este elemento de junio a noviembre (meses de mayor precipitación).

hacen cada vez más reductoras los microorganismos anaeróbicos reducen Fe^{+3} a Fe^{+2} debido a su mayor solubilidad, el hierro Fe^{+2} puede alcanzar concentraciones tóxicas cuando los suelos están en condiciones anaeróbicas durante muchas semanas. Aunque la figura 52 no muestra diferencias en el contenido de bacterias anaeróbicas entre los suelos, es importante considerar que los datos son al momento del muestreo (condiciones ideales, capacidad de campo), pero luego estos se verán alterados por los contenidos de humedad en el suelo. En este caso es posible que en el ultisol y el inceptisol la influencia de este tipo de organismos haya sido más significativo que en el entisol, por las condiciones de clima anteriormente mencionadas.

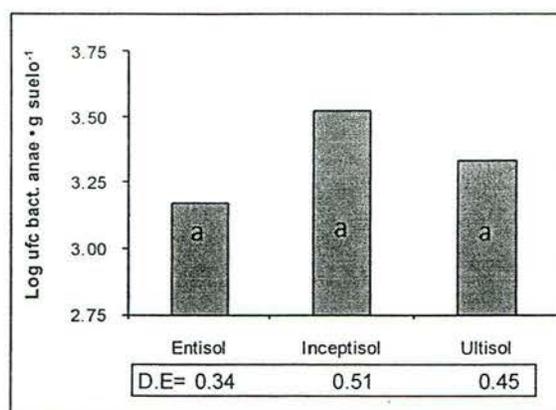


Figura 52. Contenido de bacterias anaeróbicas (Log ufc•gr suelo⁻¹) en los tres órdenes de suelo estudiados (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Esto podría ser una de las razones por las que esta finca presente solamente un 60% de raíz sana, debido a que la alta biodisponibilidad podría estar causando condiciones tóxicas a nivel de rizósfera y ocasionando problemas radiculares que limitan consecuentemente la absorción de los distintos elementos nutritivos. Las condiciones más favorables de esta finca (textura de suelo, intermedia entre AISC e INCA, lo cual favorece la penetración de las raíces, posiblemente retiene mejor el agua dado su mayor contenido de materia orgánica y su mayor precipitación (Fig. 51), aunque posiblemente esta precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo, lo cual explicaría el mayor contenido de bacterias

anaeróbicas (Fig. 52), y el relativamente bajo porcentaje de raíz sana (Fig. 50), lo cual sería consistente con lo manifestado por Taiz y Zeiger (2006).

Por otra parte, en términos de suficiencia nutricional, se encontró que sí puede existir alguna limitante en la absorción de hierro por el cultivo de piña (por ejemplo Fig. 48 ultisol a 0 kg de Fe) en condiciones de baja disponibilidad, adicionalmente si existen limitaciones a nivel de suelo que impidan el normal desarrollo de la raíz (como las condiciones del entisol estudiado) que a pesar de tener una adecuada biodisponibilidad (Fig. 33) puede verse limitado su contenido foliar (Fig. 48), bajo condiciones de deficiencias hídricas.

Sin embargo fue solo en estos casos extremos que el contenido de hierro a nivel foliar estuvo por debajo de 50 ppm (Fig. 48) y aunque AISC estuvo por debajo de este límite, la relación Fe/Mn estuvo por encima de 0.4 (Fig. 38), sin riesgo de deficiencia de acuerdo a las observaciones de Py *et al.* (1987).

Por otra parte, el ultisol, aunque no presenta diferencias con el entisol en cuanto al contenido de hierro en el tercio basal (Fig. 47) si posee una relación Fe/Mn bajo la categoría de "Riesgos de deficiencia de Fe con síntomas" de Py *et al.* (1987), según el (Cuadro 17), sin embargo, a nivel de campo fue posible notar un muy ligero amarillamiento foliar, similar al síntoma descrito para la deficiencia de Fe en este cultivo por este investigador, pero en algunas (no todas) las parcelas del tratamiento que no recibieron el suministro de hierro por aspersión, confirmando de alguna forma lo reportado por este investigador.

En cuanto al inceptisol, el cultivo posee los contenidos de Fe foliar en el tercio basal y la relación Fe/Mn más favorable de los tres, ya que presenta contenidos foliares promedio superiores a 90 ppm (Fig. 47) y la relación Fe/Mn superior a 0.4 (Fig. 38).

En cuanto a síntomas, los resultados y evidencias de campo, mostraron en términos muy generales, una coloración verde oscuro y constante en todas las parcelas del suelo entisol y con ausencia del "sombreado sintomático" reportado en la literatura para la deficiencia de

Mn. En el inceptisol al igual que el ultisol presentó una coloración verde menos intensa que el entisol, con esporádicos y muy difusos moteados de un verde más intenso que deja visibles algunas áreas de un color amarillo en las partes media a basal de las hojas, pero bastante generalizado en todas las parcelas experimentales (Figura 53).

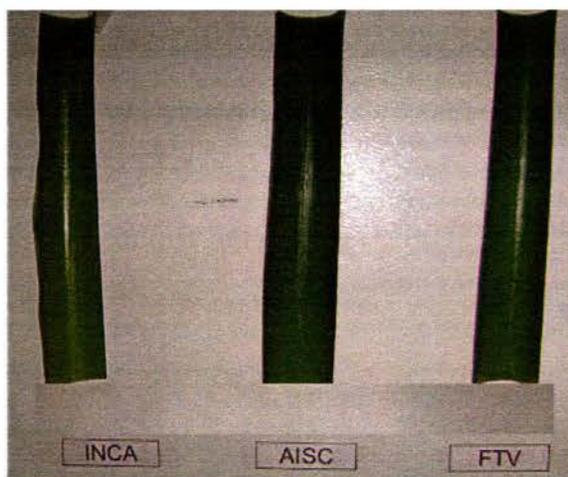


Figura 53. Coloración foliar característica de las unidades experimentales donde se estableció la investigación.

Lo anterior evidencia y confirma lo reportado por Py *et al.* (1987), el cual menciona que en cuanto al Fe y Mn en el cultivo de piña, es más importante considerar la relación foliar entre ellos, que los contenidos totales de los elementos. Los resultados obtenidos, debido a la falta de una sintomatología contundente de deficiencia, no permite concluir sobre un contenido de Fe óptimo a nivel foliar, por lo que considerando la tabla de Marshal (1971) citado por Py *et al.* (1987) en el (Cuadro 10) y los ligeros amarillamientos observados en alguna parcela de Finca Industria Cartonera Inca, correspondiente al tratamiento sin suministro de Fe por aspersión, se considera que dadas las características de los suelos de la Zona Norte, cuando se presentan relaciones foliares Fe/Mn en el rango de 0.15 - 0.40, es prudente la prevención foliar mediante la aplicación de uno o dos ciclos con sulfato de hierro, determinados por monitoreo entre los 3 y 5 meses possiembra; pero lo que sí es evidente es que en el cultivo de piña, el uso de fuentes ferrosas nutricionales utilizadas “*por defecto*” en los paquetes tecnológicos de producción, sin lugar a duda es un error

agronómico o al menos una práctica no acorde con la agricultura de precisión, la reducción de costos y la conservación ambiental; esta última en el entendido de que cualquier aplicación innecesaria sobre un agroecosistema significa de alguna manera un impacto innecesario sobre el medio ambiente, independientemente de que su nivel de contaminación sea mayor, menor o insignificante, comparado con agroquímicos de otro tipo o de diferente naturaleza.

En términos generales se encontró que el tercio basal de la hoja D, fue más sensible a la aplicación de los tratamientos que las secciones media y apical de esta hoja, ya que reflejó diferencias estadísticas entre los tratamientos, a la vez que los resultados fueron más consistentes desde el punto de vista agronómico.

Los resultados sugieren que existe una relación entre las propiedades físicas y químicas del suelo y el contenido de humedad, las cuales influyen en la disponibilidad y por ende en la absorción de hierro por el cultivo de piña, lo que evidencia la importancia de la raíz de este cultivo en la absorción de nutrientes, en este caso específico, el hierro.

Estos resultados permiten afirmar que la absorción de hierro por el cultivo de piña, al menos para las condiciones del trópico húmedo de Costa Rica donde se cultiva esta fruta, tienen una alta dependencia de las condiciones de disponibilidad de hierro propias de la química y la física del suelo donde se establece el cultivo y el agua disponible, por lo que no debe ser considerado un elemento que debe suministrarse al cultivo rutinariamente a través de aspersiones foliares del paquete tecnológico.

Los resultados encontrados contradicen la afirmación de investigadores como Bartholomew *et al.* (2002), los cuales reportan que la planta de piña posee una incapacidad propia para obtener hierro de suelos ricos en este elemento.

Por último las relaciones encontradas con el Fe y el Mn en términos de absorción concuerda con lo expuesto por Fassbender y Bornemisza (1987), los cuales indican que existe una

estrecha relación entre los niveles de Fe y Mn presentes en los suelos, donde si existen elevados niveles de Mn con valencias altas, estos oxidan el Fe^{+2} a Fe^{+3} , reduciendo su disponibilidad.

Estos resultados sugieren incluir en los programas de manejo integrado del cultivo de piña, alternativas de enmienda para la regulación de los efectos del Mn sobre las propiedades químicas de suelos con altos contenidos de este elemento.

5.8 Respuesta de las variables de crecimiento a la aplicación de los tratamientos

Se realizó un ANOVA para analizar la respuesta en crecimiento a la aplicación de los tratamientos. Las variables de respuesta utilizadas con estos fines fueron, la tasa de crecimiento acumulada ajustada, el número de hojas por planta y el largo y ancho de la hoja D.

El análisis estadístico mostró diferencias entre órdenes de suelo (Fig. 54). Sin embargo, el análisis bifactorial no mostró efecto del tratamiento (Fig. 55) ni interacción (orden x tratamiento) sobre la variable tasa de crecimiento acumulada ajustada.

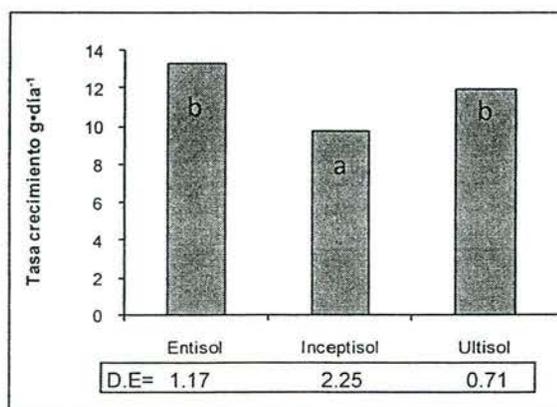


Figura 54. Tasa de crecimiento acumulada ajustada de cultivo de piña en tres órdenes de suelo (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Por lo tanto, los resultados encontrados con la tasa de crecimiento acumulada ajustada sugieren una relación más dependiente de las condiciones climáticas específicas de cada

agroecosistema, que al efecto de los tratamientos, ya que estos son congruentes con el cálculo de grados día (Fig. 21) realizado con los datos de temperatura durante el período de la investigación en cada finca.

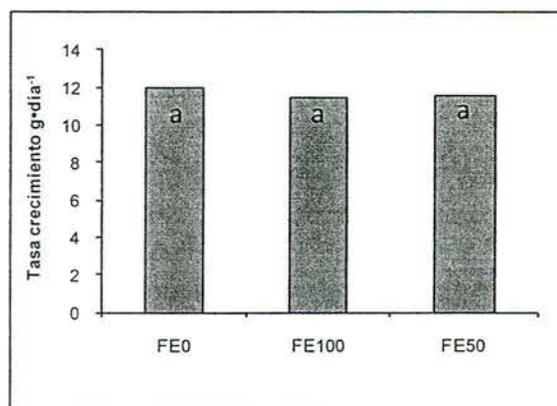


Figura 55. Tasa de crecimiento acumulada ajustada de cultivo de piña en tres niveles de suministro de hierro foliar (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Interesantemente al comparar la figura 21 (grados día) con los datos de la figura 54 (tasa de crecimiento acumulada ajustada) parece existir una correspondencia uno a uno entre los grados día acumulados por mes y los gramos de peso fresco que gana una planta por día (tasa de crecimiento acumulada ajustada), esta razón sumada a que no hubo efecto estadístico, entre el tratamiento y la tasa de crecimiento (Fig. 55) sugiere que ésta última dependió más del clima (temperatura) que del efecto de los cambios en el suministro de hierro.

Aunque no existió efecto estadístico en la interacción, es importante notar en la figura 56, que la tasa de crecimiento fue mayor en el entisol en el tratamiento sin suministro de hierro, e interesantemente el tratamiento de menor tasa de crecimiento fue el inceptisol con aporte de $13,34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de hierro y también este mismo suelo con aporte de $6,67 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de hierro.

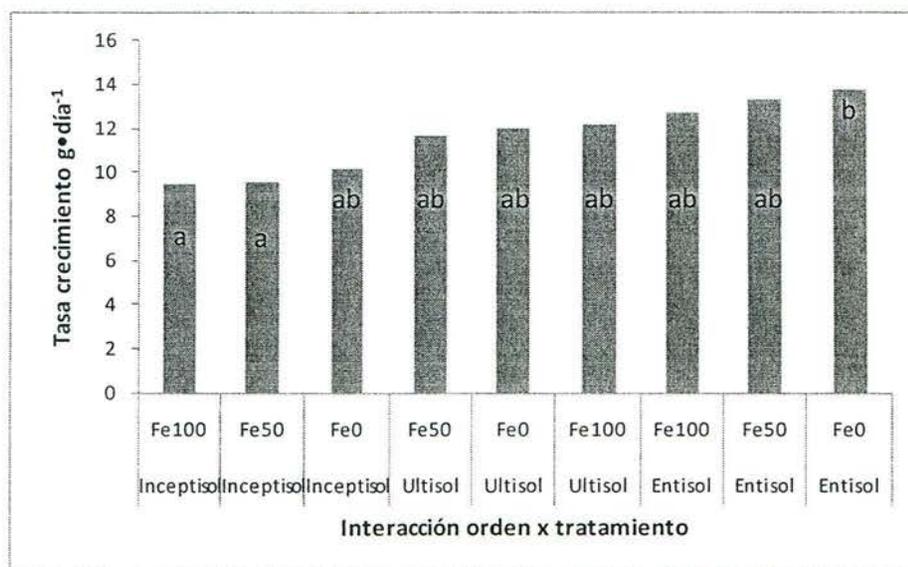


Figura 56. Interacción orden x tratamiento en la variable tasa de crecimiento (grs·día⁻¹) acumulada ajustada (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Esto sugiere de alguna manera que bajo algunas condiciones (como las altas precipitaciones que se presentaron durante el período de la investigación en esta finca) puede presentarse toxicidad de hierro, como las expuestas por Taiz y Zeiger (2006) y donde las aspersiones con este microelemento pueden retrasar el crecimiento del cultivo.

Cuadro 11. Características de crecimiento foliar por orden de suelo y por tratamiento (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Variables	Orden de suelo			Tratamiento		
	Entisol	Inceptisol	Ultisol	Fe 0	Fe 100	Fe 50
Número de hojas (n)	47.42 ± 2.55 a	47.28 ± 3.32 a	50.11 ± 2.71 a	48.81 ± 3.20 a	47.17 ± 2.57 a	48.83 ± 3.40 a
Largo de hoja D (cm)	96.68 ± 9.30 b	85.59 ± 5.36 a	89.38 ± 4.38 ab	91.40 ± 8.40 a	89.90 ± 6.77 a	90.35 ± 9.27 a
Ancho de Hoja D (cm)	6.74 ± 0.54 b	5.46 ± 0.50 a	6.35 ± 0.55 b	6.22 ± 0.76 a	6.15 ± 0.77 a	6.18 ± 0.78 a

La comparación de medias es por grupo de orden de suelo y por grupo de tratamiento (no en conjunto).

Situación similar se presentó en la variable de respuesta número de hojas por planta. El ANOVA generado solamente presentó diferencia estadística para el orden de suelo, aunque

muy cercano al límite de la probabilidad $p < 0.05$, quizás por esta razón la prueba de medias no es significativa (Cuadro 11).

Por otra parte no hubo significancia estadística para el tratamiento (Cuadro 11) ni la interacción (Fig. 57).

En general el número de hojas fue superior a 45 lo cual es una cantidad dentro del rango deseable para los criterios de inducción de la floración en la empresa BANACOL. Este resultado también se presentó en la interacción (Fig. 57).

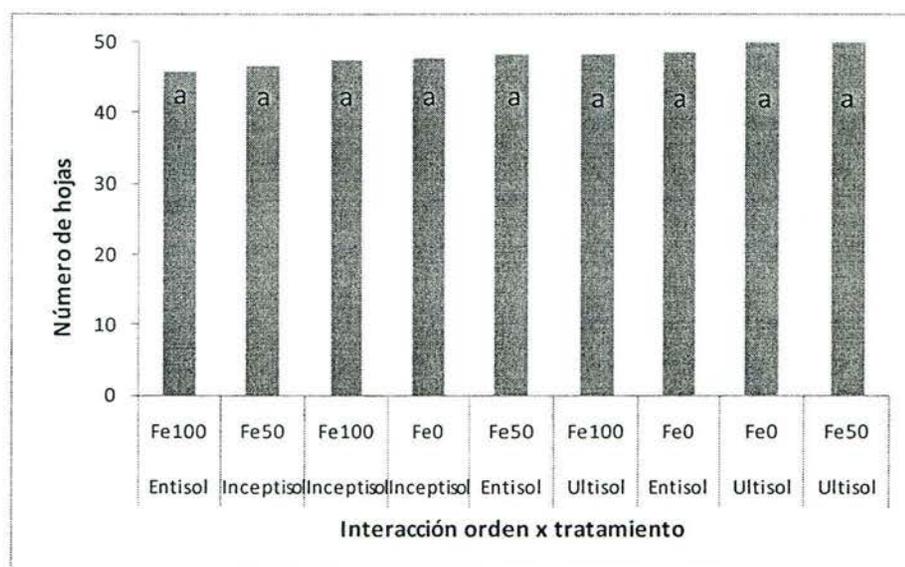


Figura 57. Interacción orden x tratamiento en la variable número de hojas por planta de piña (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha = 0.05$).

En cuanto a la variable largo de la hoja, similarmente solo se encontró diferencia estadística para el orden de suelo (Cuadro 11), no así para el tratamiento ni la interacción.

No hubo diferencias estadísticas entre el largo de las hojas en el entisol y en el ultisol, tal como sucede con la tasa de crecimiento acumulada ajustada, pero si existió diferencias entre el largo de la hoja D del entisol y del inceptisol, lo que confirmó las diferencias en el porte de plantación que se presentan entre las fincas producto de las condiciones de clima. Sin embargo, en esta variable no se presentó diferencia estadística entre el inceptisol y ultisol. Es importante mencionar que hojas más largas no necesariamente son un reflejo de

una adecuada o inadecuada nutrición o desarrollo, sino más bien corresponde con características bióticas de cada agroecosistema (Py *et al.* 1987). Por esto, la comparación del largo de hojas de plantas de piña es válida solamente dentro de fincas bajo idénticas condiciones de manejo y clima y donde existan registros del biotipo de planta deseado en la misma. Por esta razón se considera que el largo de las hojas encontradas en cada finca corresponden con los biotipos descritos por la empresa BANACOL, por lo que no se encontraron evidencias de condiciones anormales de desarrollo en ninguna de las unidades experimentales.

La comparación de medias entre tratamientos no mostró diferencias estadísticas, lo cual demuestra independencia de la variable de respuesta largo de hoja D en cuanto a los niveles de hierro utilizados (Cuadro 11) y de la misma forma concuerda con la mayor dependencia de esta variable de condiciones de clima y biotipos propios de cada agroecosistema, que de variaciones de fertilización, al menos a nivel de este microelemento. En lo que respecta a la variable ancho de la hoja D, solamente se encontró diferencia estadística en cuanto a orden de suelo (Cuadro 11). No existió efecto del tratamiento ni de la interacción (orden x tratamiento). Los resultados muestran una correspondencia con la tasa de crecimiento del cultivo, es decir los órdenes de suelo que presentaron mayor tasa de crecimiento por día durante la investigación son los mismos que presentaron un mayor ancho de hoja D (entisol y ultisol), producto como se dijo ya anteriormente del factor clima. No se encontró diferencia estadística en lo que respecta al efecto del tratamiento. Todos los tratamientos fueron superiores a 6 cm de ancho en la hoja D (Cuadro 11), lo cual es una característica mínima buscada por la empresa BANACOL en esta variable para inducir la floración en una plantación de piña, además de las variables peso de planta y uniformidad.

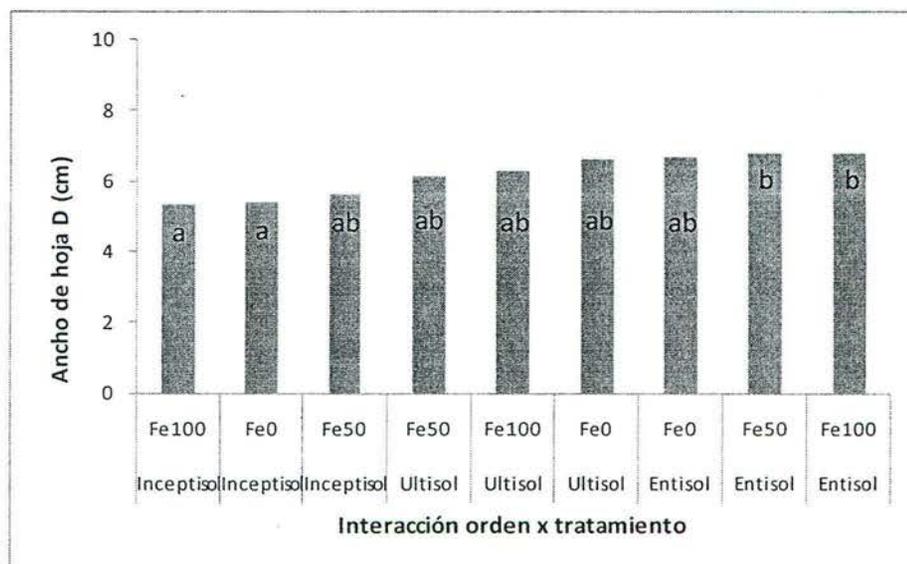


Figura 58. Interacción orden x tratamiento en la variable ancho de hoja D (letras iguales indican diferencias no significativas de acuerdo con prueba Tukey $\alpha=0.05$).

Por otra parte, aunque la interacción no fue significativa, se encontraron resultados similares a la variable tasa de crecimiento acumulada ajustada. Pues la interacción con el menor ancho de hoja D, correspondió con el inceptisol a $13,34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Fe foliar y la de este mismo suelo pero sin aplicación de hierro (Fig. 58), lo que demuestra la independencia existente entre el orden de suelo y el suministro de hierro en esta variable y más dependiente de las condiciones de clima, pues el orden de suelo que presentó el mayor ancho de la hoja D, fue el entisol, mismo orden que presentó la mayor tasa de crecimiento. En general, en las variables de crecimiento analizadas no se encontró diferencia estadística que relacionara los niveles de suministro de hierro con el desarrollo del cultivo. Se considera que la relación encontrada en el orden de suelo corresponde más con las características edafoclimáticas de cada finca, donde son tan importantes las propiedades físicas como las químicas, y donde la disponibilidad de agua tiene una participación importante en la disponibilidad de nutrientes y la sanidad del sistema radical para absorberlos, como ejemplo el caso del hierro.

Finalmente, no se puede afirmar que los contenidos y las diferentes fracciones de hierro a nivel de suelo puedan estar influenciado de manera significativa el desarrollo del cultivo, aunque se observó el indicio que en condiciones de alto contenido foliar de hierro, caso particular del inceptisol, dosis altas ($13,34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de hierro) pueden reducir el crecimiento (fig. 56).

7 CONCLUSIONES

La interpolación Kriging de Surfer v7.0 de los resultados históricos de análisis de suelo (extraídos con Mehlich 3) para la elección de áreas con contenidos bajos, medios y altos de hierro fue satisfactorio.

Se logró caracterizar y cuantificar las diferentes formas de hierro presentes en cada finca, encontrando de esta manera respuestas para las diferencias en absorción de hierro por el cultivo en el entisol, inceptisol y ultisol.

Se encontró una relación entre la clase textural del suelo y las reservas de hierro, lo que concuerda con algunos investigadores que reportan que este elemento es un componente importante tanto de silicatos primarios como de minerales de arcilla.

Se encontró una interacción entre los contenidos de materia orgánica de los suelos y el hierro asociado a esta fracción, donde posiblemente participa la fuente de la materia orgánica y la quelatación de formas asimilables como la soluble y la de cambio.

Se encontró que las fracciones de hierro que participan en la forma de hierro biodisponible (extraído con DTPA) son la soluble, la de cambio y la asociada a la materia orgánica. Las otras formas de hierro son consideradas insolubles y por ende menos biodisponibles.

Se encontró que la actividad microbiana, cuantificada a través de los parámetros bioquímicos y microbiológicos empleados en el análisis de los suelos cultivados con piña, es baja, en comparación con resultados obtenidos por otros investigadores en suelos de uso agrícola.

No se encontró ninguna relación entre la actividad microbiana y las propiedades bioquímicas del suelo con los contenidos de hierro en la hoja D del cultivo de piña, para las diferentes condiciones estudiadas.

Se encontró una relación antagónica entre los contenidos de los elementos Fe y Mn tanto a nivel de suelo como foliar, lo que confirma lo expuesto por otros investigadores.

Se confirmó lo reportado por otros investigadores en cuanto a la mayor importancia a nivel nutricional de la relación Fe/Mn foliar que los contenidos totales de estos elementos por separado.

No se encontró efecto estadístico de las aspersiones con sulfato de hierro sobre el contenido del elemento en la hoja D en ninguna de las condiciones edáficas estudiadas. Sin embargo, se encontró que bajo condiciones de deficiencias hídricas, los contenidos de hierro a nivel foliar pueden ser inferiores a 50 ppm y la relación Fe/Mn inferior a 0.2 sobre todo en suelos con altos contenidos de Mn, relación que algunos investigadores consideran como deficiencia de hierro.

Se observó que la sanidad del sistema radicular de la piña podría estar influenciado por las propiedades físicas y químicas del suelo, así como por el agua disponible.

Se encontró que el sistema radical del cultivo de piña, participa activamente en la absorción de hierro, lo que contradice lo expuesto por otros investigadores sobre la incapacidad de la planta de piña de absorber hierro aún en condiciones de alta disponibilidad.

No se encontró que las aspersiones de hierro estimularan el desarrollo de las variables de crecimiento del cultivo. Por el contrario, se encontró que en condiciones de alta disponibilidad de hierro en el suelo, la aplicación de este elemento, pueden reducir la tasa de crecimiento.

Se encontró un mayor efecto sobre las variables de crecimiento del cultivo producto de las condiciones de clima propias de cada agroecosistema, que a la aplicación de los tratamientos.

8 RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos sugieren que el uso de fuentes de hierro en la fertilización del cultivo de piña, pueden ser utilizadas para corregir desbalances en la relación Fe/Mn, mediante el diagnóstico foliar periódico, pero aplicaciones preventivas en los programas de fertilización del cultivo, en términos generales son inapropiadas, representan un gasto innecesario y un impacto ambiental al estar introduciendo al agroecosistema un insumo no necesario.

La influencia de las propiedades físicas del suelo estudiadas sobre el desarrollo y sanidad del sistema radicular, proponen maximizar el acondicionamiento del suelo durante la preparación del terreno, sobre todo en aquellos de textura pesada asociadas con la mayoría de las variables de crecimiento del cultivo, así como el aumento de los contenidos de materia orgánica lábil en aquellos de textura liviana y de poca retención de humedad.

Los resultados obtenidos podrían sugerir el uso de materia orgánica en los programas de manejo integrado del cultivo, tanto para favorecer propiedades físicas como retención de humedad, mejorar la estructura como por significar una fuente importante de hierro al cultivo, lo que podría permitir excluirlo de los programas de fertilización y utilizarlo únicamente de manera correctiva bajo diagnóstico foliar.

La dinámica del Mn a nivel de suelo como elemento antagonista del Fe, sugiere la importancia de considerar este elemento en los programas de manejo integrado del cultivo, mediante el mejoramiento del drenaje en suelos de textura pesada y el uso de enmiendas que contribuyan a precipitarlo.

Debido a que los elementos Fe y Mn enmascaran los resultados de la óxido-reductasa en la técnica de análisis de catalasa, se recomienda el uso de otras metodologías que permitan excluir este efecto en la estimación de esta propiedad bioquímica en el suelo.

Para la determinación del agua disponible en el suelo, cuando se presentan condiciones de compactación como las que se tuvo en esta investigación, es preferible no tomar la muestra en el anillo directamente en el campo, sino optar por una muestra disturbada y colocar el anillo en el laboratorio.

Dada la influencia de la disponibilidad de agua sobre la nutrición y crecimiento del cultivo de piña, se recomienda que en trabajos de respuesta a la fertilización se incorpore el uso de herramientas que ofrezcan un monitoreo continuo de la humedad del suelo, por ejemplo colocación de tensiómetros y lecturas diarias.

El uso de herramientas tecnológicas que ayuden a caracterizar con mayor precisión la sanidad del sistema radicular podría ofrecer datos más valiosos sobre el comportamiento de este órgano de la planta de piña.

Esta investigación se llevó hasta la inducción de la floración del cultivo y aunque al momento de la cosecha se realizó la revisión ordinaria y subjetiva de calidad y productividad sin hallazgos negativos en ninguna de las unidades experimentales, se podría considerar apropiado conducir la toma objetiva de datos hasta la cosecha de la fruta.

8 LITERATURA CITADA

- Acevedo, O; Ortiz, E; Cruz, M; Cruz, E; Cruz, E. 2004. El papel de óxidos de hierro en suelos. *TERRA Latinoamericana* 22: 485-497.
- ABOPAC (Abonos del Pacífico S.A). 2007. Fuentes, materias primas y paquetes de fertilización para cultivos tropicales. 1 disco compacto, 8 cm.
- Acuña, O; Peña, W; Serrano, E; Pocasangre; Enamorado, LE; Rosales, FE; Delgado, E; Trejos, J; Segura, A. 2006. La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de suelos. *In* Soprano E, Tcacenco FA, Lichtemberg LA, Silva MC, editors. *Bananicultura: um negócio sustentável. Anais XVII Reunião Internacional ACORBAT. Vol. 1: Conferências e Trabalhos Resumidos; 15-20 October 2006, Joinville, Santa Catarina, Brazil. pp. 222-223.*
- Alef, K; Nannipieri, P. 1995. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. London, UK, Academic Press. pp 362-333.
- Anderson, JP; Domsch, KH. 1975. Measurement of bacterial and fungal contribution to respiration of selected agricultural and forest soils. *Canadian Journal of Microbiology* 21: 314-322.
- Anderson, TH; Domsch, KH. 1985. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. *Biology and Fertility of Soils* 1: 81-89.
- Atlas, RM; Bartha, R. 2002. *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Trad. B Cummings. 4 ed. Madrid, ES. Pearson Educación. 677 p.
- Azcón-Bieto, J; Talón, M. 2000. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Barcelona, ES, McGraw-Hill Interamericana. 522 p.
- Baker, DE; Suhr, NH. 1982. Atomic absorption and flame emission spectrometry. *In* A. Page, Miller & Keeney (eds.), *Methods of soil analysis*, Madison, USA, pp. 13-26.
- Bartholomew, DP; Paull, RE; Rohrbach, KG. eds. 2002. *The pineapple: botany, production and uses*. New York, US, CAB International. 301 p.
- Baver, LD; Gardner, WH; Gardner, WR. 1973. *Física de suelos*. Trad. JM Rodríguez. 4 ed. México DF, U.T.E.H.A. 529 p.
- Berkeley, RCW. 1971. Microbiology of soil. *In* L. E. Hawler & A. H. Linton (eds), *Microorganisms, functions, form and environment*. Arnold, London.
- Bertsch, F. 1995. *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. Eds. A Mora; A Durán. 2 ed. San José, CR, Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica. 78 p.
- Bertsch, F. 1998. *La fertilidad de los suelos y su manejo*. San José, CR, ACCS. 157 p.

- Bertsch, F.. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, CR, ACCS. 307 p.
- Bertsch, F; Bejarano, JA; Corrales, M. 2006. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29 (3): 137-142.
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, CR, IICA. 1205 p.
- Blum, WE. 1993. Sustainable land management with regard to socioeconomic and environment soil functions. A holistic approach. *In* R. C. Wood & J Pumanski (eds.), Sustainable land management for the 21th century, Vol 2, University of Lethbridge – Canada. 115-124 pp.
- Bolaños, RA; Watson, V. 1993. Mapa ecológico de Costa Rica: aspectos generales sobre el mapa y el sistema de clasificación ecológico de zonas de vida. San José, CR. CCT.
- Bolaños, RA; Watson, V. 1993. Mapa ecológico de Costa Rica: mapa zonas de vida de Costa Rica "San Carlos CR2Cm-2". San José, CR. Esc: 1:200.000. Color.
- Bonzon, B. 1969. Observations preliminaries sur la croissance et le développement racinaire d' *Ananas comosus* (L) Merr var. Cayenne Lisse (J). *West African Sci. Ass* 14 (1-2): 73-78.
- Brady, NC. 2002. The nature and properties of soils. 13 ed. New Jersey, US. Weil, Ray R. p. 294.
- Brenes, A; Saborío, VF. 2007. Elementos de climatología: su aplicación didáctica a Costa Rica. 2 ed. San José, CR. EUNED. 92 p.
- Briceño, JA; G; Gadea, AJ. 2002. Características y uso de insumos orgánicos en suelos de Costa Rica. *In* Briceño, JA; Chaverri, F; Alvarado, G; Gadea, AJ. Eds. *Materia orgánica*. San José. Universidad Nacional. P. 50-55.
- Brookes, PC. 1985. Microbial biomass and activity measurements in soil. *Journal of Science Food Agricultural* 36: 269-271.
- Buckman, HO; Brady, NC. 1970. Naturaleza y propiedades de los suelos. Trad. RS Barceló. 5 ed. Barcelona, ES, MONTANER y SIMON. 590 p.
- Buol, S; Hole, F; McCracken, R. 1989. Soil genesis and classification. 3 ed. Iowa, US. Ames. 446 p.
- Burt, C; O'Connor, K; Ruher, T. 1998. Fertigation. California. US, The Irrigation Training & Research Center. 295 p.
- Cadahia, C. comp. 1998. Fertirrigación. ES, Mundi-Prensa. 475 p.
- Chapman, HD; Pratt, PF. 1973. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Trad. Trillas y A.I.D. Buenos Aires, MX, Trillas. 195 p.

- CNP (Consejo Nacional de Producción, CR). 2008. Subgerencia de desarrollo agropecuario. Sistema de información e inteligencia de mercados. 2008. Boletín 1, año 13. Piña fresca. San José, CR. 6 p.
- CNP (Consejo Nacional de Producción, CR). 2009. Análisis de mercado de pina. SIIM (Servicio de información e inteligencia de mercados). Mar.2009:14,30: 1-3.
- Carter, W. 1948. The effects of mealy bugs feeding on pineapple plants grown in finely atomized nutrient solutions. *Phytopathology* 38 (8): 645-657.
- Cole, CV; Innis, GS; Stewart, JWB. 1977. Simulation of phosphorus cycling in a semi-arid grassland. *Ecology* 58: 1-15.
- Collins, J. 1949. History, taxonomy and culture of the pineapple. *Economic botanic* 3 (4): 335-359.
- Corrales, M; Bertsch, F; Bejarano, JA. 2006. Los laboratorios de análisis de suelos y foliares en Costa Rica: informe del comité de laboratorios de análisis de suelos, plantas y aguas. *Agronomía Costarricense* 29 (3): 125-135.
- Cortés, V. 1993. Costa Rica: su evolución geológica está en el fondo del mar. San José, CR. Guayacán. 69 p.
- Coyne, M. 2000. Microbiología del suelo. Trad. M Rasskin. Madrid, ES, ITP-Paraninfo. 416 p.
- Dagoon, J. 2005. Agriculture & Fishery Technology. 4 ed. Philippines. US. Rex Bookstore. 185 p.
- Del Monte. 2006. The history of pineapple (en línea). Hamburg, Integra Communication. Consultado 01 jun. 2009. Disponible en <http://www.pr-integra.com>
- Denyer, P; Kussmaul, S. comps. 2000. Geología de Costa Rica. Cartago, CR. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 515 p.
- Dewis, J; Freitas, F. 1984. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Roma, IT, FAO. 252 p.
- Doran, JW; Sarrantonio, M; Janke, R. 1994. Strategies to promote soil quality and health. Citado en: Pankhurst et al (1997), *Soil Biota*. CSIRO Information, Melbourne. U. K.
- Duchafour, PH. 1984. Edafología: I: Edafogénesis y clasificación. Versión española por T. Carballas (CSIC). T-Masson ed., Barcelona.
- Ducreux, A; Godefroy, J; Lacoeyllhe, J; Marchal, J. 1980. Quelques problèmes de travail du sol dans les plantations d'*Ananas* à la Martinique. *Fruits* 35 (10): 595-604
- Fanning, D; Fanning, M. 1989. Soil: morphology, genesis, and classification. New York, US. Wiley. 395 p.

- Fassbender, H; Bornemisza, E. 1987. Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina. San José, CR. IICA. 420 p.
- Finck, A. 1988. Fertilizantes y fertilización: fundamentos y métodos para la fertilización de los cultivos. Trad. DV Hernando. Barcelona, ES, REVERTÉ. 439 p.
- Flores, E. 2005. Geografía de Costa Rica. 3 ed. San José, CR. EUNED. 369 p.
- Forsythe, W. 1980. Manual de laboratorio de Física de Suelos. IICA. San José. Costa Rica. 212 p
- García, C; Gil, F; Hernández, T, Trasar, C. eds. 2003. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Madrid, ES. AEDOS. 371 p.
- García, J; García, R. 1982. Edafología y fertilización agrícola. Barcelona, ES, AEDOS. 240 p.
- Graña, MJ. 1989. Contribución al estudio geoquímico del cobalto en suelos y plantas de la provincia de Lugo. Tesis Doctoral en Química, Universidad de Santiago de Compostela, España.
- Gutián, F; Carballas, T. 1976. Técnicas de análisis de suelos. 2 ed. Santiago de Compostela, ES, Pico Sacro.
- Henríquez, C; Bertsch, F; Salas, R. 1998. Fertilidad de suelos: manual de laboratorio. San José, CR, ACCS. 64 p.
- Henríquez, C; Cabalceta, G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, CR, ACCS. 111p.
- Jenkinson, DS; Ladd, JN. 1981. Microbial biomass in soils: measurement and turnover. *In* E. A. Paul & J. N. Ladd (eds.), Soil Biochemistry Vol. 5. Marcel Dekker, New York, pp. 415-417.
- Jenny, H. 1941. Factors in soil formation. New York, McGraw Hill. 281p.
- Jiménez, AC. 2001. Suelos tropicales. San José, CR, EUNED. 166 p.
- Jiménez, JA. 1999. Cultivo de la piña: Manual práctico para el cultivo de la piña de exportación. San José, CR, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 224 p.
- Johnson, M. 1916. Spraying of yellow pineapples plants on manganese soils with iron sulfate. Honolulu, US. Hawai Agricultural Experiments Station. 11 p.
- Johnson, M. 1928. Control of chlorosis of the pineapple and other plants. Washington, US. Ind. Eng. Chem 20 (7): 724 - 725.

- Johnson, JL; Temple, KL. 1964. Some variables affecting the measurement of "catalase activity" in soil. US, Soil Science Society of American. pp 207-209.
- Kass, DC. 1998. Fertilidad de suelos. San José, CR, EUNED. 272 p.
- Klein, C; Hurlbut, C. 1997. Manual de mineralogía. 4 ed. Barcelona, ES. 679 p.
- Korte, NE; Skopp, J; Fuller, WH; Niebla, EE; Alesii, BA. 1975. Trace element movement in soils: influence of soil physical and chemicals properties. Arizona, US. The Williams & Wilkins. 122 (6): 350 - 359.
- Loynachan, TE. 1985. Soil biology: laboratory manual. Iowa, US, State University Bookstore, Ames. 78 p.
- Lynch, J M. 1983. Soil biotechnology microbial factors in crop productivity. Blackwell Sci. Publ. Oxford, U. K.
- Kabata-Pendias, A.; Adriano, C. 1995. Trace metals. *In* E. J. Rehcigl (ed.), Soils amendments and environmental quality. Boca Raton, USA, Lewis Publ. 139-167 pp.
- Kaúrichev, IS. 1984. Prácticas de Edafología. Trad. E Vicente. Moscu. Mir.
- Lindsay, WL; Norwell, WA. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society America Journal (42): 421-428.
- Malézieux, E; Cote, F; Bartholomew, DP. 2002. Crop environment, plant growth and physiology. *In* Bartholomew, D.P; Paull, R.E; Rohrbach, K.G. eds. The pineapple: botany, production and uses. New York, US, CAB International. 301 p.
- Marchal, J. 1971. Les oligo-éléments dans l'ananas. Fruits 26 (3): 189-206.
- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. San Diego, CA, ACADEMIC PRESS. 889 p.
- Méndez, VH; Móngé, J. 2007. Costa Rica: historia natural. San José, CR. EUNED. 260 p.
- MINAE (Ministerio de Industria Energía y Minas). 1982. Mapa geológico de Costa Rica "San Carlos CR2CM-2". San José, CR. Esc: 1:200.000. Color.
- Mora, S. 1981. Clasificación morfotectónica de Costa Rica: informe semestral del Instituto Geográfico Nacional, Julio-Diciembre. San José, CR.
- Mora, S; Valverde, R.2005. Geología: procesos de la dinámica interna y externa. 2 ed. Cartago, CR. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 376 p.
- Moreau, R. 1978. Influence de l'ameublissement mécanique et de l'infiltration d'eau sur la stabilité structurale d'un sol ferrallitique dans le centre de la Côte-d'Ivoire. Cahiers ORSTEM, Série Pédologie 16 (4): 413-424.

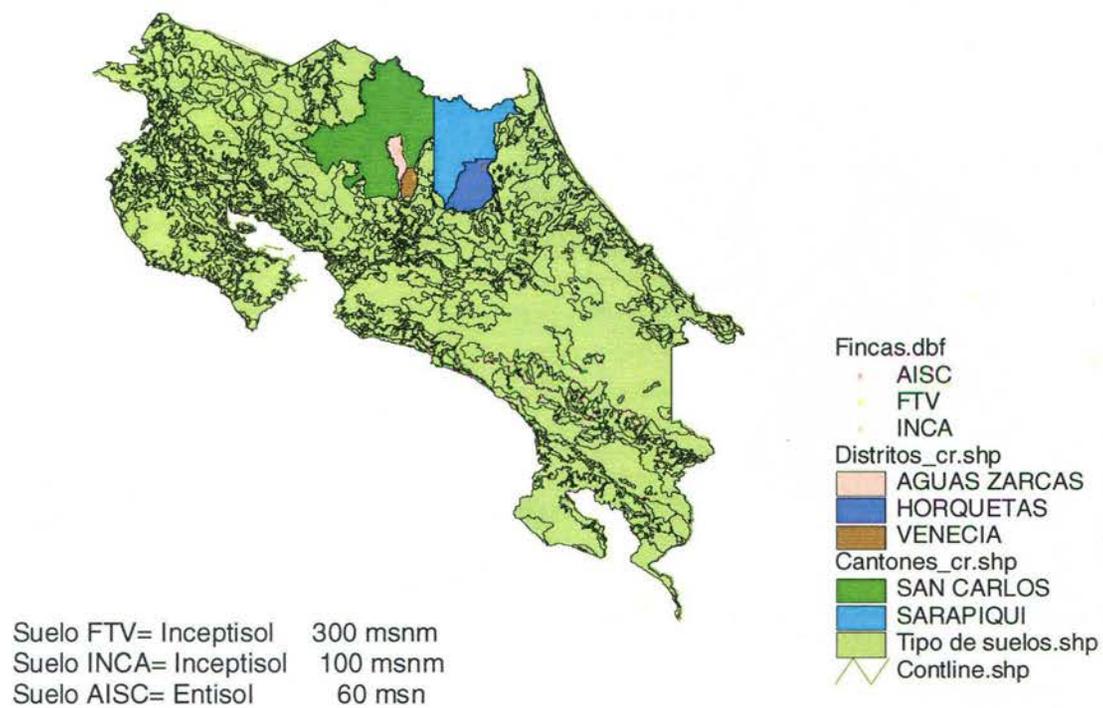
- Nannipieri, PC; Jonson, RL; Paul, EA. 1978. Criteria for measurement of microbial growth and activity in soil. *Soil Biology & Biochemistry* (10): 223-229.
- Nannipieri, PC. 1984. Microbial biomass and activity measurements in soil: ecological significance. *Curr. Persp. Microb. Ecol.*, Washington, D. C. 515-521 pp.
- Nelson, L. 1999. Estadística en la investigación del uso de fertilizantes. North Carolina, US, Potash and Phosphate Institute. 66 p.
- Núñez, J. 1992. Fundamentos de edafología. 2 ed. San José, CR. EUNED. 188 p.
- Obregón, M; Mata, X. 2008. Enfermedades emergentes en el cultivo de la piña. *In* Memorias X Congreso Mundial de *Trichoderma* (10, 2008, San José, CR). p 86. Solo resumen.
- Okihiro, G. 2009. Pineapple Culture: a history of the tropical and temperate zones. California, US. University of California Press. 272 p.
- Pankhurst, CE. 1997. Biodiversity of soil organisms as an indicator of soil health. *In* C. E. Pankhurst & B. M. Doube, V. V. S. R. Gupta (eds.), *Biological indicators of soil health*. Chap. 12. U.K, CAB Int. pp. 297-324.
- Parkinson, KJ. 1981. An improved method for measuring soil respiration in the field. *Journal of Applied Ecology* (18): 221-228.
- Peña, W. 2004. Los suelos desarrollados sobre serpentinitas y su relación con la flora endémica. Tesis Ph.D. Santiago de Compostela, ES, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 402 p.
- Pelczar, MJ; Reid, RD; Chan, ECS. 1981. Microbiología. 4a ed. McGraw-Hill, México. 633-650 pp.
- Powelson, DS; Brookes, PC; Christensen, BT. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry* (19): 159-164.
- Py, C; Lacoueilhe, JJ; Teisson, C. 1987. The pineapple: cultivation and uses. Trad. D Goodfellow. Paris, FR, Editions G.-P. Maisonneuve and Larose. 568 p.
- Raij, B van; Cantarella, H; Quaggio, JA; Cangiani, AM. eds. 1997. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2 ed. Campinas, BR, Instituto Agronômico. 285 p.
- RESUSA (Representaciones y Suministros Agropecuarios). 2008. Programa de fertilización para piña. 1 disco compacto, 8 cm.
- Richards, BN. 1987. *The microbiology of terrestrial ecosystems*. Wiley, New York.
- Rosales, FE; Pocasangre, LE; Trejos, J; Serrano, E; Peña, W. 2008. Guía de diagnóstico de la calidad y salud de suelos bananeros. Roma, IT. Bioersity International. 79 p.

- Ross, DJ; Speir TW; Cowling JC; Whale, KN. 1984. Temporal fluctuations in biochemical properties of soil under pasture II Nitrogen Mineralization end Enzyme actives. Australia Journal Soil Res. (22):319-330.
- Ross, S. 1994. Toxic metals in soil-plant systems. U.K, J. Wiley. 218-231, 417-429 pp.
- Russell, EJ W. 1973. Soil conditions and plant growth. London, UK, Longman. 849 pp.
- Salisbury, FB; Ross, CW. 2000. Fisiología de las plantas 1: Células: agua, soluciones y superficies. Trad. Alonso, JM. Madrid, ES, ITES-Paraninfo. 305 p.
- Salisbury, FB; Parke, RV. 1968. Las plantas vasculares: forma y función. Trad. R Riba; N Esparza. Mexico, DF, Herrero Hermanos Sucesores. 198 p. (Serie Fundamentos de la Botánica).
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, CR). 1980a. Manual descriptivo del mapa geomorfológico de Costa Rica. San José, CR. Imprenta Nacional. 79 p.
- _____. 1980b. Mapa geomorfológico de Costa Rica "San José CR2CM-5". San José, CR. Esc. 1:200.000. Color.
- _____. 1980c. Mapa geomorfológico de Costa Rica "San Carlos CR2CM-2". San José, CR. Esc. 1:200.000. Color.
- Salomons, W; Förstner, U; Mader, P. 1995. Heavy metals: problems and solutions. Germany, Springer. 4-27 pp.
- Serrano, J; Adams, M. 2000. Estudio del fraccionamiento de micronutrientes catiónicos en suelos ácidos de diferentes clases texturales en algunas regiones de Venezuela. Facultad de Ingeniería de U.C.V (2): 103-107.
- Sideris, CP; Young, HY; Kraus, BH. 1943. Effects of iron on the growth and ash constituents of *ananas comosus* (L) Merr. Plant Physioly 18 (4): 608-632.
- Sprechmann, P. ed. 1984. Manual de geología de Costa Rica. San José, CR. Universidad de Costa Rica. 320 p.
- Suman, L M. 1985. Fractionation methods for soil microelement. Science. 140 (1): 11 – 22.
- Tanji, KK; Gupta, SK. 1978. Computer simulation modelling for nitrogen in irrigated croplands. In D. R. Nielsen & R. M. McDonald (eds.), Nitrogen in the environment Vol. 1. Academic Press, New York, pp. 79-130.
- Taiz, L; Zeiger, E. 2006. Fisiología Vegetal. 3ra ed. Universidad Jaume. Valencia, ES. 1907 p.
- Tate, RL. 2000. Soil microbiology. 2 ed. John Wiley & Sons, New York, USA.

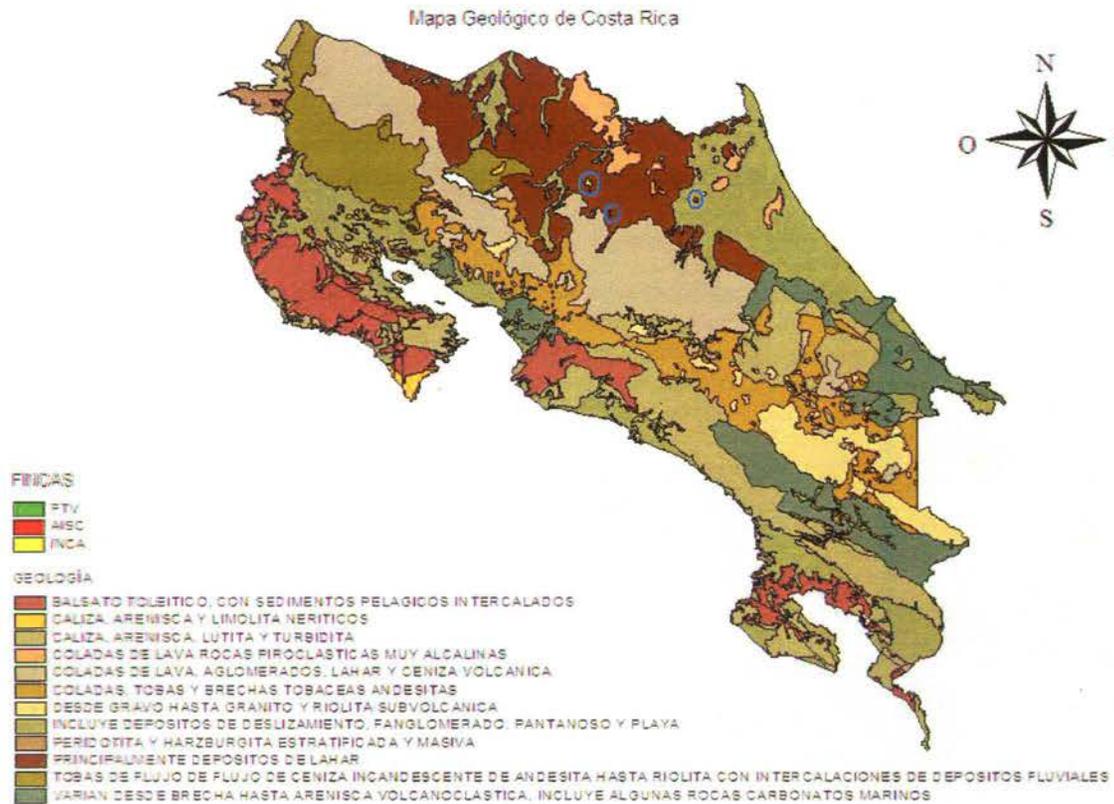
- Tisdale, SL; Nelson, WL. 1970. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Trad. J Balasch; C Piña. Barcelona, ES, Juvenil. 760 p.
- Thomas, M. 1994. Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes. Chichester, England. Wiley. 460 p.
- Tournon, J; Alvarado, GE. 1997. Mapa geológico de Costa Rica: folleto explicativo. Cartago, CR. Tecnológica de Costa Rica. Esc. 1:500 000.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual. North Carolina, US. Consultado 12 oct. 2009. Disponible en <http://soils.usda.gov/technical/lmm/>
- Vargas, G. 2006. Geografía de Costa Rica. San José, CR. EUNED. 265 p.
- Vásquez, K. 2006. Costa Rica y su exportación de piña. Entorno Bananero, órgano informativo de la industria bananera 6(20): 28-30.
- Vásquez, J. 2009. Condiciones de suelo que favorecen la incidencia de *F. oxysporum*. In evaluación de la eficacia *In Vitro* de sustancias químicas y microorganismos antagónicos del género *Trichoderma* spp., como herramienta para la toma de decisiones en el control de enfermedades "caso muerte descendente del cultivo de piña *Ananas comosus* (L) Merr". Tesis Lic. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 75 p.
- Viets, JR. 1962. Chemistry and availability of micronutrients in soils. Agricultural and Food Chemistry. 10 (1): 174 – 174.
- Walkley, A; Black, CA. 1938. An examination of the Degtjareff's method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science (37): 29-38.
- Weaver, F; Angle, J; Bottomley, P. 1994. Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. Number 5. USA. Soil Science Society of American Book Series. 1121 p.
- Wild, A. 1989. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Rusell. Madrid, ES, Mundi-Prensa. 1025 p.
- Yúfera, EP; Dorrien, JM. 1973. Química agrícola I: suelos y fertilizantes. Barcelona, ES, ALHAMBRA. 472 p.
- Zúñiga, E. 1999. Diseño del drenaje agrícola. Heredia, CR, EUNA. 120p.

9 ANEXO

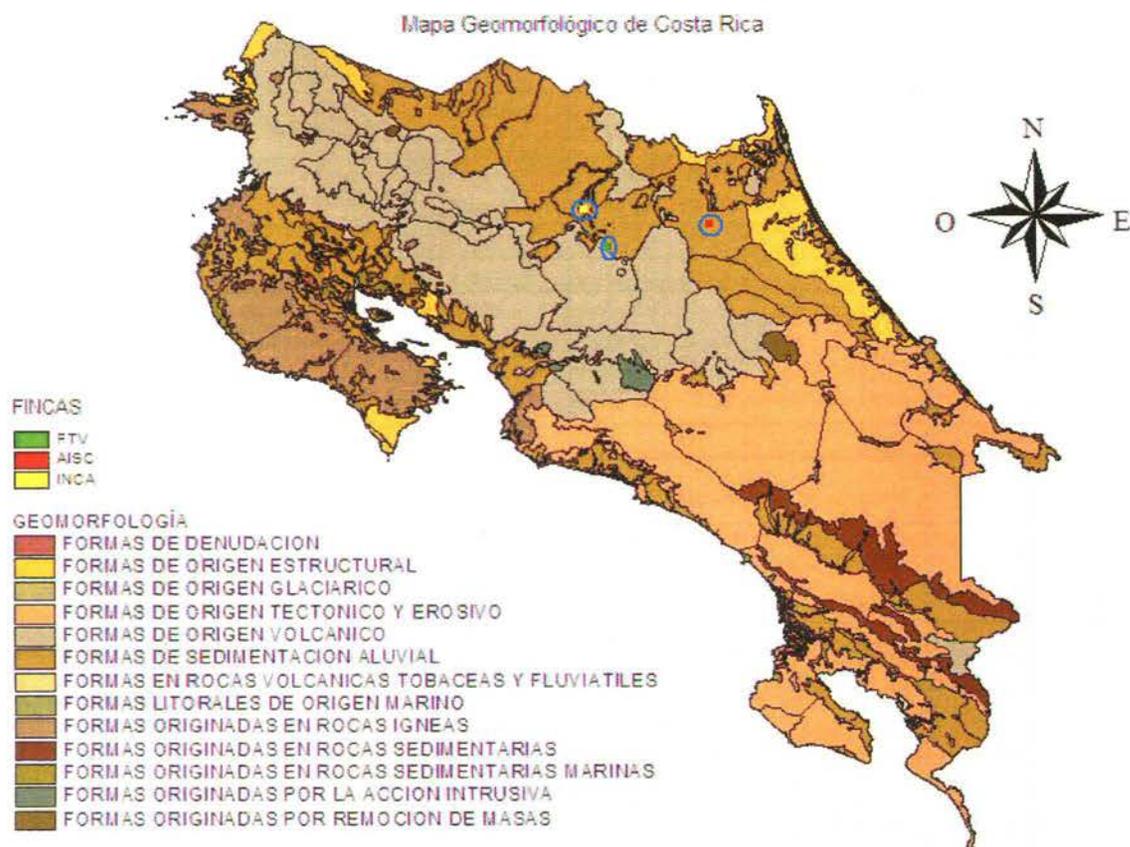
Anexo 1. Ubicación de las fincas donde se estableció la investigación. Tipo de suelo según capas de Arcview. Fuente: Centro Científico Tropical Atlas Costa Rica 2000.



Anexo 2. Ubicación de las fincas en el Mapa Geológico de Costa Rica. Capas de Arcview.
Fuente: Centro Científico Tropical Atlas Costa Rica 2000.



Anexo 3. Ubicación de las fincas en el Mapa Geomorfológico de Costa Rica. Capas de Arcview. Fuente: Centro Científico Tropical Atlas Costa Rica 2000.



Anexo 3. Variables de respuesta fisiológica y nutricional que correlacionaron con las variables independientes de fertilidad de suelo. Regresión escalonada (SAS Ins 1996) $p < 0.05$.

Variable Respuesta	Variable independiente	r^2 parcial	r^2 modelo	P>F
Peso fresco planta	CICE	0,49	0,62	0,01
	mg/LFe	0,13		
Tasa crecimiento	CICE	0,49	0,62	0,01
	mg/LFe	0,13		
Número de hojas	cmol/LCa	0,29	0,29	0,01
Largo hoja D	cmol/LCa	0,13	0,13	0,01
Ancho hoja D	pH	0,14	0,24	0,01
	mg/LP	0,10		
Peso fresco raíz	mg/LMn	0,14	0,14	0,01
Peso seco raíz	cmol/LK	0,07	0,58	0,01
	mg/LMn	0,51		
% N TA	mg/LMn	0,58	0,58	0,01
ppm Mn TA	mg/LP	0,08	0,88	0,01
	mg/LMn	0,81		
ppm Fe TA	mg/LZn	0,12	0,12	0,01
Fe/Mn TA	mg/LP	0,53	0,53	0,01
Mn/Fe TA	mg/LMn	0,40	0,40	0,01
ppm ZN TA	mg/LMn	0,32	0,32	0,01
% N TM	mg/LCu	0,08	0,70	0,01
	mg/LMn	0,62		
% K TM	cmol/LCa	0,09	0,09	0,01
Fe/Mn TM	mg/LP	0,62	0,62	0,01
ppm Cu TM	CICE	0,10	0,10	0,05
% N TB	Acidez	0,04	0,25	0,01
	cmol/LCa	0,13		
	cmol/LK	0,04		
	mg/LCu	0,03		
% K TB	CICE	0,28	0,28	0,01
ppm Mn TB	mg/LZn	0,02	0,77	0,01
	mg/LMn	0,75		
Fe/Mn TB	mg/LP	0,65	0,65	0,50
Mn/Fe TB	mg/LMn	0,42	0,42	0,01

Anexo 4. Variables de respuesta fisiológica y nutricional que correlacionaron con las variables independientes de física de suelo. Regresión escalonada (SAS Ins 1996) $p < 0.05$.

Variable Respuesta	Variable independiente	r ² parcial	r ² modelo	P>F
Peso fresco planta	g/cm ³ DP	0,36	0,36	0,01
Tasa crecimiento	g/cm ³ DP	0,36	0,36	0,01
Número hojas	% Arcilla	0,11	0,11	0,05
Largo hoja D	g/cm ³ DA	0,35	0,35	0,01
Ancho hoja D	g/cm ³ DA	0,47	0,47	0,01
Peso fresco raíz	% HG	0,28	0,56	0,01
	% Arcilla	0,28		
Peso seco raíz	g/cm ³ DA	0,05	0,60	0,05
	% Arcilla	0,55		
% raíz sana	% HG	0,41	0,41	0,01
% N TA	% Arcilla	0,58	0,58	0,01
% K TA	% HG	0,56	0,56	0,01
% Ca TA	g/cm ³ DA	0,11	0,11	0,05
Fe/Mn TA	g/cm ³ DP	0,07	0,52	0,05
	% Arcilla	0,44		
Fe/Mn TB	g/cm ³ DP	0,08	0,70	0,01
	% Arcilla	0,62		
Fe/Mn TM	g/cm ³ DP	0,09	0,60	0,01
	% Arcilla	0,51		
ppm Fe TA	g/cm ³ DP	0,21	0,32	0,05
	% Arcilla	0,10		
ppm Mn TA	g/cm ³ DP	0,02	0,84	0,01
	% Arcilla	0,82		
Mn/Fe TA	% Arcilla	0,25	0,25	0,01
ppm Zn TA	% Arcilla	0,21	0,21	0,01
ppm Cu TA	g/cm ³ DP	0,16	0,16	0,05
% N TM	g/cm ³ DA	0,06	0,61	0,01
	% Arcilla	0,54		
% K TM	% HG	0,35	0,35	0,01
% Mg TM	% Arcilla	0,29	0,29	0,01
% P TM	% HG	0,20	0,32	0,01
	% Arcilla	0,13		
% S TM	% HG	0,17	0,17	0,05
ppm Fe TM	% HG	0,25	0,25	0,01
ppm Mn TM	g/cm ³ DP	0,02	0,89	0,01
	% Arcilla	0,87		
Mn/Fe TM	% Arcilla	0,35	0,35	0,01
ppm Zn TM	g/cm ³ DP	0,10	0,44	0,01
	% Arcilla	0,34		
% N TB	g/cm ³ DP	0,06	0,72	0,01
	% HG	0,32		
	% Arcilla	0,35		
% K TB	g/cm ³ DP	0,17	0,17	0,05
% Mg TB	g/cm ³ DA	0,13	0,13	0,05
% Ca TB	g/cm ³ DA	0,13	0,13	0,05
% P TB	g/cm ³ DP	0,29	0,44	0,01
	% Arcilla	0,16		
% S TB	g/cm ³ DA	0,33	0,33	0,01
ppm Zn TB	g/cm ³ DP	0,16	0,16	0,05
ppm Fe TB	g/cm ³ DA	0,41	0,41	0,01
ppm Mn TB	g/cm ³ DP	0,03	0,85	0,01
	% Arcilla	0,82		
Mn/Fe TB	% Arcilla	0,36	0,36	0,01

Anexo 5. Variables de respuesta fisiológica y nutricional que correlacionaron con las variables independientes bioquímicas y microbiológicas de suelo. Regresión escalonada (SAS Ins 1996) $p < 0.05$.

Variable Respuesta	Variable independiente	r^2 parcial	r^2 modelo	P>F
peso fresco planta	% MO	0,26	0,38	0,01
	Respiración	0,12		
Tasa crecimiento	% MO	0,26	0,38	0,01
	Respiración	0,12		
Número de hojas	ufc BAE	0,14	0,14	0,05
Largo hoja D	% MO	0,18	0,18	0,05
Ancho hoja D	% MO	0,30	0,30	0,01
Peso fresco raíz	% C MO	0,18	0,44	0,01
	Act Catalasa	0,26		
Peso seco raíz	Act Catalasa	0,48	0,54	0,01
	ufc BANA	0,07		
% raíz sana	% MO	0,42	0,49	0,01
	ufc Hongos	0,07		
% N TA	Act Catalasa	0,60	0,68	0,01
	ufc Total	0,08		
% K TA	% MO	0,46	0,57	0,01
	ufc BANA	0,11		
% Mg TA	ufc Levaduras	0,11	0,11	0,05
% P TA	ufc Levaduras	0,15	0,15	0,05
ppm B TA	ufc Hongos	0,21	0,21	0,01
% Ca TA	ufc Hongos	0,10	0,30	0,01
	ufc Levaduras	0,19		
% S TA	ufc Hongos	0,12	0,27	0,05
	ufc Levaduras	0,15		
% Zn TA	Act Catalasa	0,26	0,26	0,01
Fe/Mn TA	Indice Mineraliz	0,11	0,52	0,01
	Act Catalasa	0,34		
	ufc BANA	0,07		
ppm Fe TA	Act Catalasa	0,28	0,28	0,01
ppm Mn TA	Act Catalasa	0,66	0,71	0,01
	ufc BANA	0,06		
Mn/Fe TA	Act Catalasa	0,18	0,18	0,05
% N TM	Act Catalasa	0,55	0,63	0,01
	ufc BAE	0,07		
% K TM	Respiración	0,12	0,46	0,01
	% C MO	0,34		
% Mg TM	Act Catalasa	0,28	0,28	0,01
% P TM	% MO	0,11	0,26	0,05
	% C MO	0,15		
ppm B TM	ufc Levaduras	0,11	0,11	0,05
ppm Cu TM	Respiración	0,14	0,30	0,05
	% C MO	0,16		
ppm Zn TM	Act Catalasa	0,32	0,32	0,01
ppm Fe TM	% MO	0,12	0,12	0,05
ppm Mn TM	Act Catalasa	0,75	0,78	0,05
	ufc BANA	0,03		
Fe/Mn TM	Indice Mineraliz	0,49	0,62	0,01
	Act Catalasa	0,13		
Mn/Fe TM	Act Catalasa	0,28	0,36	0,01
	ufc Hongos	0,08		
% N TB	% C MO	0,30	0,58	0,01
	Act Catalasa	0,28		
% K TB	% C MO	0,16	0,33	0,05
	ufc Levaduras	0,17		
% Ca TB	ufc lev	0,20	0,20	0,01
% Mg TB	ufc Levaduras	0,11	0,11	0,05
% P TB	% C MO	0,21	0,39	0,01
	Act Catalasa	0,18		
% S TB	% C MO	0,26	0,26	0,01
ppm B TB	ufc Levaduras	0,22	0,22	0,01
ppm Cu TB	% MO	0,09	0,35	0,05
	Respiración	0,16		
	% C MO	0,10		
ppm Fe TB	% MO	0,24	0,33	0,05
	ufc BANA	0,09		
ppm Mn TB	Act Catalasa	0,69	0,73	0,01
	ufc BANA	0,04		
Fe/Mn TB	Indice Mineraliz	0,11	0,64	0,01
	Act Catalasa	0,53		
Mn/Fe TB	Act Catalasa	0,32	0,32	0,01

Anexo 6. Variables de respuesta fisiológica y nutricional que correlacionaron con las variables independientes del fraccionamiento de hierro en el suelo. Regresión escalonada (SAS Ins 1996) $p < 0.05$.

Variable Respuesta	Variable independiente	r^2 parcial	r^2 modelo	P>F
Largo hoja D	Fe Sol	0,41	0,41	0,01
Ancho hoja D	Fe OC	0,48	0,48	0,10
Peso fresco raíz	Fe MO	0,35	0,42	0,30
	Fe OC	0,07		
% raíz sana	Fe OC	0,43	0,43	0,01
% K TA	Fe OC	0,57	0,57	0,01
% Ca TA	Fe OA	0,15	0,15	0,05
% P TA	Fe MO	0,14	0,14	0,05
% S TA	Fe OA	0,15	0,15	0,05
ppm Cu TA	Fe Tot	0,19	0,19	0,01
ppm Fe TA	Fe Sol	0,27	0,27	0,01
% K TM	Fe OC	0,47	0,47	0,01
% Mg TM	Fe Res	0,27	0,27	0,01
% P TM	Fe MO	0,21	0,21	0,01
% S TM	Fe OA	0,16	0,16	0,05
ppm Cu TM	Fe OA	0,11	0,11	0,05
ppm Zn TM	Fe Tot	0,47	0,47	0,01
ppm Fe TM	Fe OA	0,28	0,28	0,05
ppm Mn TM	Fe Sol	0,01	0,11	0,01
	Fe Tot	0,09		
Fe/Mn TM	Fe OC	0,08	0,08	0,01
Mn/Fe TM	Fe Res	0,49	0,49	0,01
% N TB	Fe MO	0,60	0,60	0,01
% Ca TB	Fe OA	0,19	0,19	0,01
% Mg TB	Fe OA	0,14	0,14	0,05
% P TB	Fe MO	0,40	0,40	0,01
% S TB	Fe OA	0,44	0,44	0,01
ppm Zn TB	Fe OC	0,18	0,18	0,01
ppm B TB	Fe OA	0,14	0,14	0,05
ppm Fe TB	Fe OC	0,47	0,47	0,01
ppm Mn TB	Fe Tot	0,11	0,11	0,01
Fe/Mn TB	Fe Sol	0,04	0,12	0,50
	Fe Res	0,08		