



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**Calidad del suelo y estado nutrimental del
género *Pinus* en la vertiente occidental del
Iztaccíhuatl y Popocatépetl.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGA**

P R E S E N T A

MARÍA DEL ROSARIO GRANADOS DAMIÁN

DIRECTOR DE TESIS: DR. GERARDO CRUZ FLORES

MÉXICO, D. F.

**TESIS CON
FALLA DE CARGEN**

JULIO DE 2003



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

"Hay hombres que luchan un día
y son buenos.
Hay otros que luchan un año
y son mejores.
Hay quienes luchan muchos años
y son muy buenos.
Pero hay los que luchan toda la vida:
Esos son los imprescindibles".

Bertolt Brecht



Para ti papá,
porque tú eres
uno de los
imprescindibles.

TE AMO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B

AGRADECIMIENTOS

A ti Blandina, por haberme parido y ponerme en el camino de la vida. A ti Vérulo por el apoyo siempre incondicional. A ambos por el amor que le dan a mi hija.

A la familia Granados por su enorme ayuda, sin ustedes esto no hubiera sido posible. Los amo y se que cada uno en su respectiva trinchera, lograremos conquistar muchas metas.

A ti Daniela por aparecer en mi vida, regalarme la oportunidad de amarte, por recordarme lo que es la nobleza humana, por tu alegría, tus ganas de vivir y dejarme ser tu mamá.

A ti Gabriel por el amor que me das, pero sobre todo por ser mi mejor amigo y dejar siempre tu mano cerca para cuando se necesite. Nunca olvides que ocupas un lugar muy especial y único en mi vida (eres una especie en peligro de extinción).

Estos genes
mi padre
ustedes los
moménto
Esa
i mi

A la UNAM, por su grandeza, al CCH Oriente, porque todo empezó ahí y especialmente a ésta nuestra FES Zaragoza por existir y recordarnos que todos juntos, profesores y alumnos la fortalecemos.

A los amigos que encontré a lo largo de estos años. No los nombro porque jamás me perdonaría (y ustedes tampoco), omitir a alguno, pero saben que esta niña los quiere y trataré de estar cuando me necesiten.

A todos los profesores de la carrera por sus conocimientos y por algo que los caracteriza, el trato personal hacia nosotros los alumnos.

A los profesores y compañeros del L-301, desde luego a los amigos del Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal, que me hicieron más amable el camino.

A los sinodales de esta tesis (antitesis, porque no existe investigación que concluya), por el tiempo dedicado a su revisión y las observaciones hechas lo que ayudó a mejorarla.

A los Maestros en Ciencias Efraín Ángeles Cervantes y Armando Cervantes Sandoval, por el apoyo a este trabajo.

Al Biólogo Ramiro Ríos por conducirme hacia la Edafología.

A Gerardo Cruz por la dirección de esta tesis y por estos años en los cuales te convertiste en un amigo al que quiero mucho.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	1
SUMMARY	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Concepto de suelo	6
2.2 Calidad del suelo	7
2.2.1 Indicadores de calidad del suelo.	8
2.2.2 Índices de calidad de suelo	10
2.3 Características del género <i>pinus sp.</i>	11
2.4 Relaciones del suelo y comunidades vegetales.	13
2.4.1 Propiedades físicas del suelo.	13
2.4.2 Propiedades químicas del suelo.	16
2.4.3 Propiedades bioquímicas	23
2.4.4 Propiedades biológicas.	26
2.5 Análisis estadístico multivariado (AEMV),	28
2.5.1 Análisis de componentes principales (ACP).	29
2.5.2 Análisis de cluster (ACT).	32
3. PROBLEMÁTICA	33
3.1 Antecedentes.	33
3.2 Justificación.	33
4. HIPÓTESIS	35
5. MATERIALES Y MÉTODOS	36
5.1 Descripción de la zona de trabajo.	36
5.1.1 Características del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl.	36
5.1.2 Delimitación de la zona de estudio.	38
5.2 Toma de muestras.	40
5.2.1 Muestras de suelo.	40
5.2.2 Muestras foliares.	40
5.2.3 Muestras de mantillo.	41
5.3 Pretratamiento de muestras.	42
5.4 Determinación en laboratorio.	42
5.4.1 Análisis físicos y químicos en suelo.	42
5.4.2 Análisis bioquímico y biológicos en suelo.	43
5.4.3 Análisis químicos en tejido vegetal.	43

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
6.1 Caracterización de suelo a lo largo del gradiente altitudinal.	46
6.2 Indicadores físicos de calidad del suelo.	49
6.3 Indicadores químicos de calidad del suelo.	53
6.4 Indicadores biológicos de calidad del suelo.	58
6.5 Indicadores bioquímicos de calidad del suelo.	62
6.6 Estimación de la reserva nutrimental por aporte del mantillo.	66
6.7 Estado nutrimental del género <i>Pinus</i> .	67
6.8 Calidad del suelo.	70
7. CONCLUSIONES	74
COMENTARIOS Y SUGERENCIAS	76
8. LITERATURA CITADA	77
ANEXOS	83

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Algunos indicadores de calidad e información que sobre el suelo proporcionan.	10
Cuadro 2. Categorías de pH en el suelo	15
Cuadro 3. Nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal	18
Cuadro 4. Estrategias de adaptación* de plantas silvestres a suelos con baja y alta disponibilidad nutrimental.	22
Cuadro 5. Valores de referencia para necesidades de contenidos nutrimentales en pinos escoceses y para todos los pinos.	23
Cuadro 6. Caracterización de suelo e información de campo en los sitios de observación en el PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl, de acuerdo a su altitud.	45
Cuadro 7 Principales propiedades físicas de los suelos en los sitios de estudio.	49
Cuadro 8. CP del grupo de los parámetros físicos.	51
Cuadro 9. Índice físico de calidad de suelo	52
Cuadro 10. Principales propiedades químicas de los suelos en los sitios de estudio	54
Cuadro 11. CP del grupo de los parámetros químicos.	56
Cuadro 12. Índice químico de calidad de suelo	57
Cuadro 13. Estimación cualitativa de poblaciones microbianas de los suelos	58
Cuadro 14. CP del grupo de los parámetros biológicos.	60
Cuadro 15. Índice biológico de calidad.	61
Cuadro 16 Propiedades bioquímicas de los suelos en los sitios de estudio	63
Cuadro 17. CP del grupo de los parámetros bioquímicos.	65
Cuadro 18. Índice bioquímicos de calidad de suelo	65
Cuadro 19 Reserva nutrimental en el mantillo de los sitios de observación.	66
Cuadro 20. Contenido nutrimental en tejido foliar** de pino en el declive occidental del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl.	68
Cuadro 21. Resumen del ACP, para cada grupo de parámetros estandarizados*	70
Cuadro 22. Índices de calidad de suelo para cada sitio de observación.	72

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción de agentes químicos en compartimentos del suelo y su pérdida o transferencia fuera del mismo (Modificado de Wolt, 1994). FS, fase sólida; FL, fase líquida; FG, fase gaseosa; FV, fase viva.	3
Figura 2. Cultivo en la zona comunal del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl	7
Figura 3. Influencia recíproca entre los factores bióticos y abióticos en el suelo, procesos implicados dentro del sistema del que el suelo y su calidad son parte fundamental.	8
Figura 4. Morfología del género. Izquierda, <i>Pinus montezumae</i> de 10 años de edad en el Parque Nacional Iztaccíhuatl -Popocatepetl. derecha, fascículo y cono de la especie.	12
Figura 5. Imagen satelital del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.	36
Figura 6. Zona de estudio (en rojo los sitios de observación).	39
Figura 7. Toma de muestra; (a) foliar, (b)suelo 0-20 cm, (c)suelo 0-10 cm, (d) mantillo	41
Figura 8. Determinación del N-total por el método semimicro-kjeldhal.	43
Figura 9. Cadena de suelos y perfil de vegetación en el declive occidental del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.	48
Figura 10. Dispersión de CP (parámetros físicos).	51
Figura 11. Dendrograma de similitud entre sitios, con base en los indicadores físicos.	52
Figura 12. Relación de la altitud con el porcentaje de nitrógeno (N) y materia orgánica del suelo (MOS).	54
Figura 13. Dispersión de los CP (parámetros químicos).	56
Figura 14. Dendrograma de similitud entre sitios, con base en los indicadores químicos.	57
Figura 15. Placas teñidas de acuerdo a la técnica de Rossi- Cholodny y del lado derecho una microfotografía 100X de una colonia bacteriana	59
Figura 16 Efecto de los cambios de los parámetros físicos y químicos en el desarrollo de las poblaciones microbianas.	60

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 17. Dispersión de los CP (parámetros biológicos).	60
Figura 18. Dendrograma de similitud entre sitios, con base en los indicadores químicos.	61
Figura 19. Dispersión de los CP (parámetros bioquímicos)	65
Figura 20. Dendrograma de similitud entre sitios, con base en los indicadores bioquímicos.	65
Figura 21. Relación N/P en los pinos del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Especies ordenadas de acuerdo a su localización dentro del gradiente altitudinal..	69
Figura 22. Correspondencia de la calidad del suelo respecto a la MOS: a) Efecto aditivo; b) Efecto multiplicativo.	71
Figura 23. Correspondencia de la calidad del suelo con el % de N y la respiración microbiana.	72

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Calidad del suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl.

RESUMEN

Esta investigación se realizó entre los años 2001 y 2002, con el objetivo de determinar mediante análisis físicos, químicos, biológicos y bioquímicos, los indicadores de calidad del suelo y su posible relación con el estado nutrimental del género *Pinus*, en el declive occidental de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Se ubicaron 12 sitios de observación representativos de igual número de unidades ecológicas. En éstos se colectaron muestras compuestas de suelo 0 a 20 y 0 a 10 cm de profundidad, del mantillo y tejido foliar.

Se describió la tendencia y relación entre los diferentes parámetros del suelo y la concentración de algunos nutrimentos esenciales determinados en las muestras de suelo y tejido vegetal a lo largo del declive.

Se realizó un análisis estadístico multivariado (AEMV) a cada grupo de indicadores de calidad del suelo de los que se obtuvieron a partir de las variables originales (VO), componentes principales (CP), definidos cada uno, por una variable robusta (VR). Los CP encontrados explican el mayor porcentaje de la varianza entre datos de los doce sitios. Se realizó además la construcción y análisis de cluster (ACT).

Como resultado del análisis de CP, se obtuvieron los índices de calidad de suelo parciales (ICS) y una ecuación que los integra mediante una sumatoria, definiendo la calidad del suelo (CS) por sitio estudiado: $CS = ICS_{(físico)} + ICS_{(químico)} + ICS_{(biológico)} + ICS_{(bioquímico)}$.

Los sitios denominados O1 (Cañada la Calzada) y W de D 14 (Cerca de Cañada Tezozolco), tuvieron la mayor y menor calidad edáfica respectivamente, lo cual quedó confirmado en el análisis de clusters, que muestra estos lugares agrupándose al final y al inicio, respectivamente.

Se encontró que de 30 parámetros físicos, químicos, bioquímicos y biológicos determinados, el % de humedad, el pH activo, el % de arena, la materia orgánica del suelo, el Ca, K, el C en biomasa microbiana, la actividad fosfatásica y poblaciones de bacterias y algas son las propiedades más sensibles, presentan una relativa facilidad para medirlos y reflejan condiciones naturales del suelo. Por lo que se proponen como indicadores de calidad de suelos forestales con características similares. Respecto al estado nutricional del género *Pinus*, del análisis foliar, se observó que el P y el Mg pueden limitar el crecimiento y desarrollo de los individuos en la zona de estudio, mientras que N, K y Ca, se encontraron en concentraciones para un crecimiento óptimo.

Palabras clave: Parque Nacional, estado nutrimental, análisis estadístico multivariado, índice de calidad.

©Granados D, M. R. 2003. Calidad del suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.

PAGINACIÓN DISCONTINUA

SOIL QUALITY AND NUTRIMENTAL STATE OF THE GENUS *PINUS* IN THE WESTERN SLOPE OF THE IZTACCIHUATL AND POPOCATÉPETL.

SUMMARY

This investigation was carried out among the years 2001 and 2002, in order to determining of physical, chemical, biological and biochemical analysis use, the indicators of soil quality and its possible relationships with the nutrimental state of genus *Pinus*, in the western decline of the volcanos Iztaccíhuatl and Popocatepetl. 12 representative observation places of same number of ecological units were located. In these samples made up soil were collected 0 at 20 and 0 to 10 cm of depth, of humus and foliate tissue.

Were described the tendency and relationship among the different parameters of soil and the concentration of some nutrients essential determined in the soil samples and tissue vegetable along the decline. Were carried out an statistical analysis multivariated (SAMV) to each group of indicators of soil quality of those that were obtained starting from the original variables (OV), principal components (PC), defined each one, for a robust variable (RV). The opposing PC explains the biggest percentage in the variance among data of the twelve places. it was also carried out the construction and cluster analysis.

As a result of the analysis of PC, the partial soil quality indexes (SQI) were obtained and an equation that integrates them by means of addition, defining the soil quality (SQ) for studied location: $SQ = SQI \text{ (physical)} + SQI \text{ (chemical)} + SQI \text{ (biological)} + SQI \text{ (biochemical)}$.

The location denominated O1 (Cañada La Calzada) and W of D 14 (near Cañada Tezozolco), they had the biggest and smaller soil quality, that which was confirmed respectively in the clusters analysis that shows these locations grouping at the end and the beginning.

It was found that of 30 determinated physical, chemical, biochemical and biological parameters, the % of humidity, the active pH, the% of sand, the soil organic matter, the Ca, K, and C in microbial biomass, the phosphatase activity and bacterias and algae populations are the most sensitive properties to disturbed, relative easiness to measure them and they reflect natural conditions of soil. For what propose as indicators of soil quality in forest with similar characteristic. Regarding the nutritional state of the genus *Pinus*, of the analysis to foliate, it was observed that the P and the Mg can limit the growth and development of trees in the study area, while N, K and Ca, were in concentrations for a good growth.

Words key: National Park, nutrimental state, statistical multivariate analysis, quality index.

©Granados D, M. R. 2003. Calidad del suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.

1. INTRODUCCIÓN

A diferencia del aire y agua (mezcla de gases de proporciones más o menos constantes y compuesto químico de propiedades físicas y químicas particulares), que son recursos fundamentales para la vida, tal como la conocemos; el suelo, es un cuerpo natural de edad y espesor variable cuya formación y composición son resultado de su interacción con el clima y la biota del sistema. El suelo se presenta constituido por tres fases, aproximadamente 50% sólida, 25% líquida y 25% gaseosa.

Evaluar y determinar la calidad del aire y del agua implica un menor grado de dificultad que el que representa, asignarle un valor de calidad al recurso suelo debido, entre otras cosas, a que el ambiente del suelo es un sistema altamente heterogéneo, donde los agentes químicos (nutrimentos) para las plantas se encuentran tanto en compartimentos bióticos (microorganismos del suelo), y compuestos de la materia orgánica del suelo, así como en el ambiente físico del suelo (en la fase líquida, sólida y gaseosa) con una interacción profunda (Figura 1).

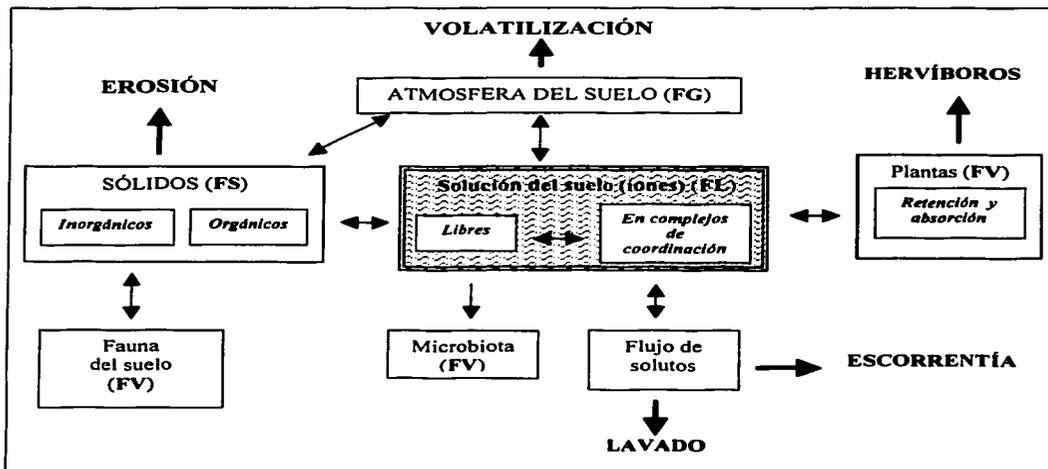


Figura 1. Interacción de agentes químicos en compartimentos del suelo y su pérdida o transferencia fuera del mismo (Modificado de Wolt, 1994). FS, fase sólida; FL, fase líquida; FG, fase gaseosa; FV, fase viva.

Las diferentes pérdidas de material nutritivo del suelo atribuibles al lavado, escorrentía y erosión, la disminución de N debida a procesos desnitrificantes y la permanente extracción de P, K, Ca y demás nutrimentos esenciales, que realiza la flora y la fauna, influyen sobre la cantidad y balance de nutrimentos o sustancias químicas presentes, lo que origina deficiencias nutrimentales o toxicidad que influyen negativamente sobre el crecimiento (Cruz-Flores, 2003). El suelo forestal como cuerpo de la superficie terrestre, manifiesta características peculiares adquiridas bajo la influencia de tres factores que son poco comunes en otros suelos: Hojarasca o humus, raíces de árboles y organismos específicos, cuya existencia depende de la presencia de vegetación forestal (Bockheim, 1991).

En cualquier ecosistema terrestre, el suelo cumple con tres funciones básicas como son: (i) proporcionar un medio para el desarrollo de la vegetación la cual es base de las redes tróficas, (ii) regular y dividir el flujo del agua a través del ambiente y (iii) servir como un sistema amortiguador ambiental (Etchevers *et al.*, 2000).

Los bosques de pino ocupan el 90% de los bosques de coníferas que se localizan en nuestro país. El área boscosa de México se encuentra en una gran crisis debida a la gran presión que ejercen sobre éstas las comunidades humanas que habitan cerca de ellas y además por la explotación irracional que se hace de las mismas, la tala inmoderada de árboles aún en edad productiva, el ocoteo y el cambio de uso de la tierra, entre otros, son algunos de los factores que propician la urgencia de programas de manejo sustentable en estas zonas, que propicien opciones de trabajo viables, para los que del bosque viven.

Además de la presión antropogénica descrita, el decline forestal entendido como cambios en estructura (distribución de edades, composición de los estratos y estructura de copa entre otros) que inciden en la muerte masiva de árboles, se ha atribuido a diversos efectos entre los que se tienen a los contaminantes atmosféricos que actúan en el ambiente aéreo de la vegetación (follaje y tallos) y a los cambios químicos en los suelos forestales producidos por depositaciones elevadas de nitrógeno y de metales pesados o cambios en el pH (Cowling, 1982; Andersson, 1989; Oren y Schulze, 1989, Auclair *et al.*, 1992 y Fen, 1996, citados en López, 1997).

El análisis de tejido foliar, es un procedimiento especialmente sensible para detectar deficiencias y toxicidad, que en plantas cultivadas, se relacionan normalmente con el rendimiento (Maldonado *et al.*, 2001). Se propone como supuesto que, en especies forestales, el análisis de tejido foliar puede reflejar el estado de salud de los árboles y con ello utilizar la concentración de

nutrimentos en tejido foliar particularmente del género *Pinus* como un indicador del estado de calidad del suelo.

Por la belleza escénica que ofrece a la vista del Valle de México, el sistema montañoso Iztaccíhuatl-Popocatepetl y por la gran cantidad de servicios ambientales que brindan los ecosistemas de montaña tanto a las poblaciones vecinas como a otras más alejadas pero que reciben la influencia benéfica de ellos y con el objetivo de delimitar el área de estudio se restringió la presente investigación a la exposición o declive occidental del área adyacente al PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Con base en lo anterior y en que el suelo, ese cuerpo delgado que cubre la superficie terrestre, representa la diferencia entre la sobrevivencia o extinción de todas las formas de vida terrestres, con esta investigación se pretende contribuir a establecer, a partir de propiedades físicas, químicas, bioquímicas y biológicas, a aquellos indicadores que permitan determinar la calidad del suelo, entendida esta como la capacidad para funcionar dentro de los límites del ecosistema para sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de plantas y animales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concepto de suelo

El suelo es un cuerpo viviente, natural, dinámico y vital para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, que se forma a una tasa de 1 cm por cada 100 - 400 años, por interacción del clima, topografía, biota y material parental. Por el tiempo que toma su formación se puede considerar al suelo como un recurso no renovable en la escala humana de tiempo (Doran y Parkin, 1994). Los componentes del suelo incluyen materiales minerales (arena, limo y arcilla) materia orgánica, agua, gases y organismos vivos como lombrices, insectos, bacterias, hongos, algas y nemátodos. Hay un continuo intercambio de moléculas y iones entre las fases sólida, líquida y gaseosa que está mediado por procesos químicos físicos y biológicos. A esta definición se debe añadir que el suelo además de ser un sistema vivo y dinámico cumple con funciones primordiales, entre las que están las de mantener la productividad de las especies vegetales que en él se establecen, la biodiversidad, la calidad del aire y del agua así como la salud humana y el hábitat (Etchevers *et al.*, 2000).

Un suelo forestal es una parte de la superficie terrestre que sirve como medio para el sostenimiento de la vegetación forestal consta de materia mineral y materia orgánica impregnada por diversas cantidades de agua y aire y que está habitada por organismos. Manifiesta características peculiares adquiridas bajo la influencia de tres factores que son poco comunes en otros suelos: Hojarasca o humus forestal, raíces de árboles y organismos específicos, cuya existencia depende de la presencia de vegetación forestal (Bockheim, 1991).

Para los árboles los suelos forestales son importantes porque:

1. Ofrece soporte mecánico.
2. Retienen y transmiten el agua y los gases.
3. Sirven como hábitat para los macro y microorganismos.
4. Retienen, intercambian y fijan las sustancias nutritivas.

Es innegable la presión que ejercen las actividades humanas en la condición de los recursos, su degradación es una problemática actual y global, como receptor de estos efectos el deterioro

del suelo, tiene efectos permanentes dentro del sistema, por el papel que este desempeña y por el tiempo que tarda su formación (Enkerlin, 1997).



Figura 2. Cultivo en la zona comunal del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl

La Figura 2 muestra una zona de cultivo, que junto con la tala clandestina y el turismo son las más frecuentes perturbaciones en la zona de estudio.

2.2 Calidad del suelo

Esta es una cualidad inherente de cada suelo independientemente de la edad y origen del mismo. Doran y Parkin, (1994) definen a la calidad de un suelo como "su capacidad para funcionar dentro de un ecosistema determinado para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del ambiente, la vegetación y la fauna". Por su parte Franzluebbbers (2002) complementa este concepto tomando como base la premisa de manejo, estabilización y mejoramiento de las funciones del suelo en los ecosistemas.

Planteado de esta manera, conocer qué tan bueno es un suelo, es prioritario, para localizar los problemas puntuales de cada suelo, dar solución a los mismos y realizar un programa de manejo sustentable, no solo del suelo sino del sistema del que éste es parte.

2.2.1 Indicadores de calidad del suelo.

Los indicadores de la calidad del suelo son propiedades físicas, químicas y biológicas, procesos y características que pueden ser utilizadas para monitorear al suelo (USDA-NRCS, 1996, Seybold *et al.*, 1997). Se pueden dividir en cuatro grupos: visual, físicos, químicos y biológicos (USDA, 1997).

La evaluación de la calidad del suelo resulta un proceso complicado por la intrincada red de interacciones entre los factores bióticos y abióticos que controlan los procesos físicos, químicos, biológicos y bioquímicos que se realizan en el suelo (Figura 3).

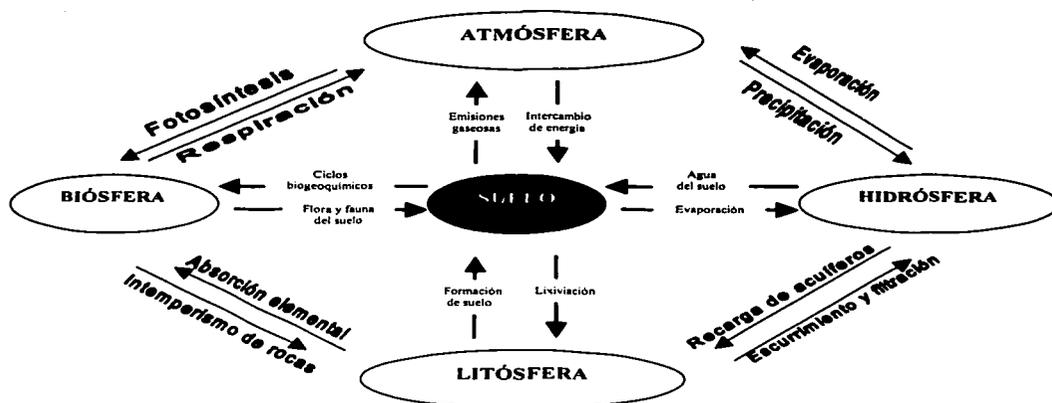


Figura 3. Influencia recíproca entre los factores bióticos y abióticos en el suelo, procesos implicados dentro del sistema del que el suelo y su calidad son parte fundamental.

Contar con un conjunto de indicadores que sirvan para evaluar el grado de calidad de un suelo resulta sumamente importante. Esto por su parte es complicado dado el conjunto de factores físicos, químicos y biológicos implicados, así como, las interacciones en el tiempo y espacio que se realizan en el suelo, además del enfoque que cada estudio tenga, con lo que cambiarán los indicadores utilizados y el peso de cada uno de estos en el dictamen final.

En general un indicador de la calidad del suelo debe cumplir con algunos de los siguientes criterios:

- ◆ Describir los procesos que ocurren en el ecosistema.
- ◆ Integrar propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos.
- ◆ Ser accesibles a muchos usuarios y aplicable a condiciones de campo.
- ◆ Reflejar los atributos de sustentabilidad que se quieren medir.
- ◆ Ser sensibles a las variaciones del clima y del manejo del suelo.
- ◆ Su medición pueda ser reproducible.

Bajo el Marco de Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), un buen indicador además deberá:

- ◆ Ser preferentemente aplicable en un amplio rango de sistemas y condiciones socioeconómicas y culturales.
- ◆ Ser sencillo de entender.
- ◆ Centrarse en aspectos prácticos.

Para integrar y sintetizar adecuadamente la información obtenida con el monitoreo de indicadores, se recomienda; determinar umbrales o valores de referencias para cada indicador, construir índices, presentar los resultados de manera conjunta y examinar las relaciones entre indicadores (Mäser *et al.*, 2000).

A lo largo de los últimos años se ha realizado la estimación de valores de un conjunto de parámetros que sirvan como indicadores de la calidad del suelo, en el Cuadro 1 se encuentran algunos de estos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuadro 1. Algunos indicadores de calidad e información que sobre el suelo proporcionan.

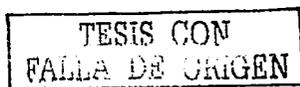
Indicador	Información que proporciona.
pH	Alcalinidad o acidez del suelo
Conductividad eléctrica	Permite establecer una estimación de la cantidad de sales que contiene la solución del suelo
Textura	El ambiente físico en el que se desarrollan las raíces, los organismos, la capacidad de retención hídrica, y nutrimental
Densidad real y aparente	Grado de compactación y el ambiente físico de las raíces y de los organismos
% de humedad	Capacidad de retención hídrica del suelo, en un momento determinado
% de Materia Orgánica	Reserva de nutrimentos con la que cuenta el suelo
Nutrimentos disponibles	Los niveles en los que se encuentran cada uno de los nutrimentos esenciales para completar el ciclo vegetativo y reproductivo de las plantas.
Actividad enzimática	La capacidad de catalizar los compuestos de la fase orgánica del suelo
Actividad microbiana	La capacidad de mineralizar la materia orgánica presente en el suelo.

Modificado de Larson y Pierce, 1994 y Seybold *et al.*, 1997).

2.2.2 Índices de calidad de suelo

La importancia de la construcción de índices radica en el hecho de que facilita la comparación entre indicadores con unidades disímiles. Con los índices se puede tener a todos los indicadores en un formato común, sin por ello perder la información original. En general, las relaciones entre indicadores pueden ser bastante complejas, ya sean sinérgicas, de competencia o mixtas.

La construcción del índice debe servir para proporcionar un dictamen de calidad, pero además debe servir para depurar los indicadores utilizados, dejando aquellos que presenten mayor robustez, en el sentido de que sean sensibles a la condición que se desea medir y que influyan de manera crítica en la evaluación de calidad (Mäser *et al.*, 2000).



2.3 Características del género *Pinus* sp.

Los bosques de coníferas ocupan el 15% del territorio del país y más de nueve de cada diez de estos corresponden a los bosques de *Pinus* y *Pinus-Quercus*, más que de *Juniperus* y *Abies* (Rzedowski, 1978).

Con excepción de la Península de Yucatán, Campeche y Tabasco, existen bosques de pino en todas las entidades federativas del país. Su distribución geográfica coincide a grandes rasgos con la de los elevados macizos montañosos como los de Baja California, la Sierra Madre Occidental, el Eje Volcánico Transversal, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Norte de Oaxaca y las Sierras de Chiapas, aunque se pueden encontrar manchones en la Sierra Madre Oriental y en la de Tamaulipas.

Altitud. El grueso de la masa forestal de pinos mexicanos se desarrolla a altitudes entre los 1500 y 3000 msnm, aunque pueden alcanzar los 4100 msnm, esto indica que a elevaciones mayores los pinares también son frecuentes y constituyen el único tipo de bosques que alcanza el límite superior de la vegetación arbórea, situado en el norte de México a 3650 msnm (Rzedowski, 1978). En la parte occidente del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl correspondiente al Estado de México los pinares se localizan a partir de los 2700 msnm, encontrando al *Pinus hartwegii* a partir de los 3300 msnm. Cuando la altitud de la montaña excede los valores mencionados, el pinar limita en su parte superior con los zacatonales o con otro tipo de vegetación alpina (SARH, 1993).

Clima. Aunque son muy variados los climas en que se desarrollan, en general los pinares son comunidades resistentes a heladas y a periodos de sequía muy largos. Las temperaturas en las que se establece el grueso de los pinares oscila entre los 10°C y 20°C, como media anual.

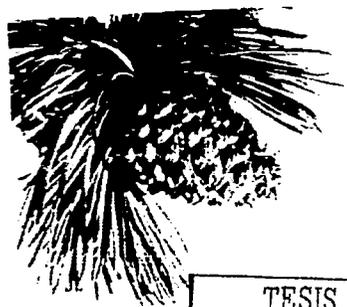
Geología. Por lo que se refiere al sustrato geológico, los pinares en México prefieren áreas cubiertas por rocas ígneas, ya sean antiguas o recientes. El contacto entre ígnea y sedimentaria corresponde a un límite entre pinar y otra comunidad.

La afinidad de los pinares con la roca ígnea obedece además a que por evolución muchas especies de pinos estuvieron ligadas cronológicamente con épocas de intensa actividad volcánica.

Suelos. Las coníferas toleran mejor los suelos ácidos con valores de pH entre 5 y 7, el color del suelo, la textura y el contenido de nutrimentos presentan variaciones considerables de un lugar a otro (Rzedowski, 1978). La profundidad de los suelos en los que se desarrollan es muy variable, por lo regular se encuentran en Andosoles y Litosoles. Entre los nutrimentos más importantes para los pinos están el N y el P (Rivera., 1989).

Morfología. Las diferencias morfológicas entre las especies dominantes, la diversidad y la variedad de condiciones ecológicas en las que prosperan los pinares son los factores responsables de la amplia gama de variantes dentro del tipo fisiológico general de un bosque. Las especies de los pinos se caracterizan por la disposición de sus hojas perennes en fascículos (Figura 4). En las plántulas están implantadas de forma independiente, dispuestas en espiral sobre el tallo. Después de uno o de dos años de crecimiento el pino empieza a producir sus hojas en haces o fascículos, que contienen cada uno un número característico de hojas alargadas y aciculares. Un fascículo de agujas de pino es una rama de crecimiento limitado. (Raven *et al.*, 1991).

Los frutos son piñas formadas por escamas leñosas insertas en un eje; estas escamas se abren a los dos o tres años y tienden a diseminar los piñones, cada escama encierra dos semillas. Las semillas o piñones tienen forma ovoide y están provistos, generalmente, por un ala membranosa (Santamarina *et al.*, 1997).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4. Morfología del género. Izquierda, *Pinus montezumae* de 10 años de edad en el Parque Nacional Iztaccihuatl -Popocatepetl. Derecha, fascículo y cono de la especie.

El eje volcánico transversal, que es la cordillera más alta del país, constituye otra área de gran concentración de pinares, aunque muchas veces mermados por el impacto de la presión demográfica. Rzedowski (1978) indica que *P. montezumae* es la especie más abundante en esta zona y en muchos sitios forma bosques puros, frecuentemente bien desarrollados. En sitios un poco más húmedos suele mezclarse o ceder lugar a *P. pseudostrobus*, en cambio, en suelos muy someros o en situaciones secas lo desplazan *P. rudis* y *P. teocote*. En las vertientes inferiores, a menos de 2000 m de altitud, *P. oocarpa* y *P. michoacana* son los pinos más comunes, formando por lo general bosques bajos y espaciados, en los cuales también pueden intervenir *P. lawsonii*, *P. herrerae*, *P. pringlei*, *P. leiophylla*, además de especies de *Quercus*. A elevaciones superiores a 3000 msnm prevalecen bosques de *P. hartwegii* y de *Abies religiosa*.

2.4 Relaciones del suelo y comunidades vegetales.

El suelo es un cuerpo natural muy dinámico, en el que las propiedades físicas, químicas, bioquímicas y biológicas están estrechamente interrelacionadas, haciéndolo además de complejo de sumo interés e importancia tanto biológica como económica. Por ello es que debe realizarse un estudio minucioso de los diferentes parámetros edáficos indicadores de su calidad y el efecto que pueden tener en el estado nutrimental de las especies vegetales que en él se desarrollan.

2.4.1 Propiedades Físicas del suelo

De las propiedades del suelo las físicas se alteran con menor facilidad durante el manejo forestal, que sus propiedades químicas, pero estas nos proporcionan información espacial y temporal de gran importancia, que sirve para evaluar la calidad edáfica.

Textura

La textura del suelo forestal influye en su productividad, pero esta influencia puede ser de carácter más bien indirecto, ejemplo de esto son los suelos margos y arcillosos que a menudo sostienen árboles que demandan un alto grado de humedad y de nutrimentos como los abetos y los tsugas. Los pinos prefieren en general los suelos arenosos y sueltos (Santamarina *et al.*, 1997). La textura en sí tiene poco efecto sobre el crecimiento de los árboles, en tanto que la humedad, el

balance de nutrimentos y la aireación sean los correctos. Un campo forestal tiende a modificar su medio ambiente hasta el grado en que la textura del suelo sea de importancia secundaria.

Densidad aparente

La densidad aparente tiene gran relación con otras propiedades del suelo como son el espacio poroso, la textura y la materia orgánica. Los suelos que tienen alto contenido de materia orgánica tienen menores densidades aparentes que los suelos bajos en este componente. Los suelos que son sueltos y porosos tienen bajos pesos por unidad de volumen (densidad aparente), en tanto que los que son compactos tienen valores altos. Como resultado de esta conjunción de variables se explica que la densidad aparente de los suelos forestales varíe desde 0.2 en algunas capas orgánicas hasta casi 1.9 g cm^{-3} en las arenas gruesas. La densidad aparente tiene efecto sobre el crecimiento arbóreo y el desarrollo radical de las especies forestales que en el sitio se desarrollan (Gavande, 1982; Pritchett, 1991).

Espacio Poroso

La porosidad de la mayor parte de los suelos forestales varía del 30 al 65%; los suelos que sostienen bosques mixtos pueden tener un mayor volumen poroso, que los suelos que sostienen bosques de una sola especie dominante (Pritchett, 1991).

Color

El color por lo general lo imparten pequeñas cantidades de materiales coloreados como el hierro, el manganeso y la materia orgánica.

El color es en sí de escasa importancia para el crecimiento de los árboles. Sin embargo sirve como indicador de varias características importantes del suelo, como son su origen geológico y el grado de intemperización del material edáfico, así como su grado de oxidación y reducción, así como el contenido de materia orgánica, lixiviación o acumulación de los compuestos químicos de hierro, que pueden influir en gran medida en la calidad del sitio. El color no es un indicador infalible de las condiciones del suelo, a causa de otros factores que tienen mayor sensibilidad. Aunque debe hacerse notar que el color del suelo influye en la temperatura de los suelos desnudos, pero tiene un efecto mucho menor sobre la temperatura de los suelos forestales.

Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno (pH) se mide en una solución de suelo y agua, con lo que se mide la acidez activa, pero cabe señalar que en los suelos también existe una reserva de acidez intercambiable (o potencial). Lo que en suma nos proporciona la acidez total de un suelo. La lectura del pH es por lo general menor cuando se hace en una solución acuosa que en una solución salina y disminuye a medida que la concentración de sal aumenta, debido al mayor desplazamiento de los iones de hidrógeno y de aluminio a partir del complejo del intercambio. La mayor parte de los suelos forestales tienen una reserva sustancial de acidez potencial.

La mayor parte de los suelos forestales van de moderada a extremadamente ácidos, como resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición del litter y la consiguiente lixiviación de las bases del suelo mineral superficial.

Cuadro 2. Categorías de pH en el suelo.

Clases	Intervalo
Extremadamente ácido	3.5 – 4.4
Muy fuertemente ácido	4.5 – 5.0
Moderadamente ácido	5.6 – 6.0
Ligeramente ácido	6.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
ligeramente alcalino	7.4 – 7.8
moderadamente alcalino	7.9 – 8.4
fuertemente alcalino	8.5 – 9.0
Fuertemente ácido	5.1 – 5.5

(USDA-NRCS, 1998)

En el Cuadro 2 se muestran los intervalos de acidez y alcalinidad generales para el suelo. La mayor parte de los suelos forestales están en una escala de pH entre los 3.5 a 6.5 aproximadamente. Los valores por debajo de 3.5 sólo se hallan por lo general cuando están presentes los ácidos libres. Como consecuencia, los tipos de vegetación que crecen sobre un suelo tienen la probabilidad de tener una influencia notable sobre la acidez del suelo debido a diferencias inherentes en el contenido de bases de su litter. Esta asociación no siempre es evidente ni siempre es clara la relación de causa y efecto. Debido a que las especies se diferencian en cuanto a su tolerancia hacia la acidez del suelo, las condiciones de éste pueden influir en la constitución de las comunidades vegetales más que las comunidades sobre la

reacción del suelo. Ejemplo de esto son los géneros *Tsuga*, *Picea*, *Abies* y *Pinus* que crecen mejor en suelos muy ácidos y en consecuencia su litter es ácido.

Muchos de los efectos directos visibles de la acidez del suelo sobre el crecimiento de los árboles pueden, de hecho, ser el resultado de los efectos indirectos sobre las condiciones del suelo tales como la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrimentos. Coleman y Thomas (1967, citados por Pritchett, 1991) señalaron que los ácidos solubles, como los que resultan de la actividad biológica, pueden producir fluctuaciones importantes en la acidez del suelo, ya que los ácidos orgánicos producidos durante la descomposición del litter forestal, son agentes importantes de intemperización y productores de acidez en el suelo. Algunos productos de descomposición de la materia orgánica pueden actuar como quelatos que facilitan la hidrólisis del Al.

La acidez de la mayor parte de los suelos forestales varía sólo de manera ligera con los cambios estacionales. Se ha observado algunos cambios con un máximo de pH que generalmente se halla en los suelos minerales durante el periodo de invierno y los mínimos en el verano (Nhring, 1934, citado por Pritchett, 1991). El grado de variación está influenciado por la magnitud de los cambios estacionales, pero los cambios raramente son superiores a una unidad. El pH de la cubierta forestal puede alcanzar su máximo en el otoño, sobre todo en los bosques caducifolios, debido a la liberación de bases a partir de las hojas recién caídas.

2.4.2 Propiedades químicas del suelo.

Es indiscutible la importancia que tienen estos parámetros por su gran sensibilidad a los cambios en el ecosistema y de igual manera en la calidad del suelo por lo que deben conocerse para elaborar un programa de manejo adecuado del recurso suelo.

Intercambio catiónico.

Se considera que el intercambio catiónico es de gran importancia en los suelos, más que el intercambio aniónico, debido a que la mayor parte de los nutrimentos esenciales son absorbidos por las plantas en forma de cationes. Cationes tales como calcio, magnesio, potasio, amonio, sodio, aluminio, hierro e hidrógeno están cargados positivamente y son atraídos hacia las superficies con carga negativa de las partículas coloidales del suelo, tanto minerales (sustitución isomorfa) como orgánicas (-COOH y -OH).

El grado en que todos los sitios de intercambio catiónico del suelo son ocupados por bases, como el Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+} , se llama porcentaje de saturación de bases. Por efecto del clima y de los materiales de formación y la vegetación, los suelos forestales poseen un grado muy bajo de saturación de bases. Por regla el pH y el nivel de fertilidad de un suelo aumenta en la misma medida que aumenta el grado de saturación de bases. Esto es consecuencia no solamente del aumento cuantitativo en las bases del suelo, si no también de la facilidad con que las bases son liberadas por este y absorbidas por las plantas (Pritchett, 1991).

Nutrición mineral

Una característica de la mayoría de las plantas superiores es que las sustancias requeridas para su alimentación son principalmente de tipo mineral, estas sustancias están compuestas por elementos químicos que son esenciales para el desarrollo adecuado y sobre todo completo del ciclo vegetativo. Para los dieciséis elementos nutrimentales reconocidos actualmente se han establecido de manera internacional los siguientes criterios de esencialidad.

1. La falta de un elemento esencial impide a la planta completar su ciclo vegetativo.
2. La falta o deficiencia es exclusiva del elemento en cuestión y sólo puede ser corregida suministrando dicho elemento y no otro.
3. El elemento esencial está relacionado directamente con la nutrición de la planta, bien por ser constituyente de alguna sustancias esenciales, o por participar en funciones vitales de la planta (Marschner, 1995).

Dependiendo de la cantidad utilizada por la planta, estos elementos se dividen en macro y micro elementos, quedando agrupados de la siguiente manera (Cuadro 3).

Cuadro 3. Nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

Elemento	Símbolo	Forma química asimilable
MACROELEMENTOS		
Carbono	C	CO ₂
Hidrógeno	H	H ₂ O
Oxígeno	O	CO ₂ , O ₂
Nitrógeno	N	NO ₃ ¹⁻ , NO ₂ ¹⁺
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ ¹⁻ , HPO ₄ ²⁻
Potasio	K	K ¹⁺
Calcio	Ca	Ca ²⁺
Magnesio	Mg	Mg ²⁺
Azufre	S	SO ₄ ²⁻
MICROELEMENTOS		
Hierro	Fe	Fe ²⁺ , Fe ³⁺
Cloro	Cl	Cl ¹⁻
Boro	B	H ₃ BO ₄
Cobre	Cu	Cu ²⁺
Manganeso	Mn	Mn ²⁺
Molibdeno	Mo	MoO ₄ ²⁻
Zinc	Zn	Zn ²⁺

La calidad del suelo influye sobre la eficiencia nutrimental la cual es la relación entre la producción de biomasa por unidad suministrada de nutrientes (USDA-NRCS, 1997), el estado nutrimental depende necesariamente de la calidad del suelo y de dicha eficiencia.

Nitrógeno

El N tiene una influencia determinante en los suelos, a través del efecto de la temperatura y de las condiciones de humedad (regímenes de lluvias) sobre el desarrollo de las plantas y microorganismos.

En suelos de Canadá y Estados Unidos de América, Jenny (citado por Fassbender y Bornemiza, 1987) encontró relaciones inversas entre temperatura y contenido de N y materia orgánica de los suelos; es decir al aumentar la temperatura, decreció el nivel de N en el suelo. Encontró, además, una asociación entre las condiciones de pluviosidad y el contenido de N; al intensificarse las lluvias se desarrolló una vegetación más exuberante y la deposición de restos fue mayor, elevando así el contenido de N, en estas mismas condiciones, también se presentó una fijación biológica de N bastante activa.

El N-total en los suelos forestales se encuentra sobre todo en las capas de humus de la cubierta forestal y en el horizonte A1. La cantidad varía desde no más de 1 t ha⁻¹ en algunos suelos arenosos excesivamente drenados, hasta 30 t en algunos bosques boreales que tienen una

profunda acumulación de humus. En estos suelos la acumulación del N se ve favorecida por el clima frío y por una gran humedad del suelo durante gran parte del año.

El N de los materiales orgánicos queda disponible para las plantas superiores solamente después que la relación C:N se aproxima a 10:1. Con el tiempo esta relación disminuye debido a la pérdida del C en forma gaseosa en tanto que el N permanece inmovilizado en los compuestos orgánicos.

Además de su función en la formación de proteínas, el N es parte integral de la molécula de clorofila. Un abastecimiento adecuado del elemento por lo general está asociado con un aumento en el vigor de la vegetación y un color verde oscuro. Se supone que una cantidad adicional de N retrasa la madurez de las plantas, aumenta en los árboles el porcentaje de la primera madera, también aumenta la susceptibilidad de ciertas enfermedades y propicia el ataque de los insectos. Sin embargo no es probable que el N afecte de manera adversa las propiedades de los árboles en presencia de cantidades adecuadas de otros nutrimentos (Pritchett, 1991; Salisbury y Ross, 2000).

Fósforo

El contenido total de P depende de la textura de los suelos, tanto en áreas de clima templado como tropical, ya que cuanto más fina sea la textura, mayor es el contenido de P total. De manera general, el contenido de P total disminuye con la profundidad del suelo, lo que es aplicable por la disminución de la materia orgánica y de los fosfatos orgánicos. Aún no se ha investigado el efecto del alopino y de los complejos organominerales en el contenido de P, pero se puede esperar que lo influyan, llevándolo a valores altos. La mineralización de fosfatos orgánicos depende de muchos factores: pH, contenido de materia orgánica, microorganismos, humedad, temperatura. La liberación de H_2PO_4^- resultante es muy importante para la nutrición vegetal (Fassbender y Bornemiza, 1987). La materia orgánica es la fuente principal de P para los árboles en muchos suelos. El contenido total de P en los suelos pueden variar desde no más de 20 a 40 kg ha⁻¹ en el horizonte superficial (A1) de la mayor parte de los suelos arenosos hasta más de 2000 kg en algunos suelos ricos en fosfatos.

La disponibilidad de fósforo inorgánico para los árboles depende principalmente de:

- 1) La acidez del suelos y sus efectos sobre la solubilidad del Fe, Al y el Mn, que forman precipitados insolubles en suelos muy ácidos.

- 2) La disponibilidad de Ca, que puede reaccionar con el P para reducir su solubilidad en suelos menos ácidos.
- 3) La actividad de los microorganismos que controlan el promedio y la cantidad de descomposición de la materia orgánica.

Las raíces de los árboles de los bosques tienen asociaciones micorrizales que aumentan la capacidad de estos árboles para utilizar las formas menos disponibles de fosfatos en los suelos (Tisdale y Nelson, 1988; Pritchett, 1991).

Potasio

En el caso del K este actúa como catalizador, pero es, no obstante, esencial para muchas funciones fisiológicas. Entre ellas figura el metabolismo de los carbohidratos, la síntesis de proteínas, la activación de varias enzimas y la actividad de los tejidos meristemáticos. Al K se le puede relacionar con la resistencia a ciertas enfermedades. Con concentraciones de entre 20 a 200 ppm de K en forma intercambiable presentes en los suelos forestales se asume que es suficiente para un buen desarrollo de las especies arbóreas. Se sospecha que los árboles son capaces de absorber K, con ayuda de las micorrizas radicales. Además de ser muy poca la cantidad de K que parece lixiviarse por debajo de la cubierta radical superficial en los bosques no perturbados (Pritchett, 1991).

Casi no existen estudios completos sobre el ciclo del K en plantaciones forestales tropicales y subtropicales. De acuerdo con los datos sobre rotación de *Pinus patula* de treinta años, se remueve 696 kg de K ha⁻¹ del suelo; de la demanda anual de 78 kg de K ha⁻¹, aproximadamente la mitad (35 kg K ha⁻¹) retorna al suelo en forma de hojarasca. Para el caso de *Pinus caribaea* de diez años de edad se acumulan, en total, 375 kg K ha⁻¹, de los cuales 152 se encuentran en las acículas y 105 en las ramas y tallos; el resto aparece en las raíces y en la capa de mantillo. (Fassbender y Bornemiza, 1987).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Calcio

El Ca existe en los suelos sobre todo en forma inorgánica y en el suelo superficial puede haber de 50 a 1000 ppm o más en forma intercambiable. Los suelos desarrollados en regiones con precipitación pluvial relativamente baja por lo general contienen cantidades mayores de Ca que los suelos de las regiones húmedas y los horizontes más profundos por lo general contienen más calcio que los superficiales. En la mayoría de los suelos ligeramente ácidos, el Ca es el catión principal en el complejo de cambio. Los árboles de maderas duras acumulan concentraciones de este nutrimento en el suelo superficial mediante la caída anual de las hojas (Tisdale y Nelson, 1988; Pritchett, 1991).

Magnesio

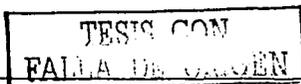
El Mg es el único constituyente mineral de la molécula clorofila y es un elemento esencial para la fotosíntesis. Es un elemento móvil. La mayor parte de los suelos forestales contienen elevadas cantidades de Mg (Pritchett, 1991; Salisbury y Ross, 2000).

Azufre

El S en los suelos forestales se acumula en la materia orgánica de los horizontes superiores. Aunque el S se utiliza aproximadamente en las mismas cantidades que el P, pero se encuentra más disponible en el suelo (Pritchett, 1991). En los suelos volcánicos, según Blasco (1972, citado por Fassbender y Bornemiza, 1987), la mineralización del S depende del porcentaje de arcilla, disminuyendo cuando ésta aumenta. Se cree que esto se debe a la reabsorción del SO_4^{2-} por los coloides del suelo. El mismo autor indica que, en esos mismos suelos y debido a su excelente aireación el contenido de humedad tiene poca influencia sobre la formación de SO_4^- o S^{2-} , aún cuando ese contenido sea alto.

El estado nutrimental de una especie, se relaciona con los intervalos de deficiencia, suficiencia y toxicidad de uno o varios nutrimentos esenciales.

La curva de abastecimiento nutrimental y su relación con el crecimiento, es función de la especie y del tipo de suelo.



Las especies cultivadas tienen demanda nutricional diferente a la que presentan la vegetación natural, las cuales son normalmente tolerante a distintas restricciones edáficas (estrategia tipo I) y adaptada a sitios con suelos pobres en nutrimentos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estrategias de adaptación* de plantas silvestres a suelos con baja y alta disponibilidad nutrimental.

Disponibilidad nutrimental	Estrategia Tipo I Perenne Tolerantes a restricciones Crecimiento lento	Estrategia Tipo II De ciclo corto o Ruderales Crecimiento rápido
BAJA (Sitios pobres en nutrimentos)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baja tasa de absorción de nutrimentos 2. Bnja tasa de crecimiento de parte aérea y radical 3. Alta relación raíz/parte aérea 4. Alta longevidad foliar 5. Alta concentración de nutrimentos en tejidos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baja tasa de crecimiento 2. Bajo almacenamiento de nutrimentos 3. Alta relación raíz/parte aérea 4. Alta tasa de absorción
ALTA (Sitios ricos en nutrimentos)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baja respuesta de crecimiento de raíz y parte aérea 2. Alto almacenamiento de nutrimentos (<i>Consumo de lujo</i>) 3. Baja eficiencia de uso de los nutrimentos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alta tasa de absorción de nutrimentos 2. Alta tasa de crecimiento 3. Alta eficiencia de uso de los nutrimentos 4. Disminución de la relación raíz/parte aérea

* modificado de Grime, 1982.

Las plantas con estrategia tipo I, son de alta relación raíz/parte aérea pero tienen menos eficiencia en uso de nutrimentos que las ruderales y plantas cultivadas anuales (estrategia tipo II). La característica más notable de plantas con estrategia tipo I, es la reducción al máximo del crecimiento y no aumenta aun con alta disponibilidad de nutrimentos, los cuales sin embargo, sí se absorben (consumo de lujo) y almacenan para utilizarse cuando la disponibilidad de ellos se vea reducida. Tienen también estrategia tipo I plantas adaptadas a elevadas altitudes sobre el nivel del mar como *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *Salix*, *Prunus*, *Alnus*, *Budleia*, *Senecio*, *Eupatorium*, *Archibaccharis* (Grime, 1982)

Existen pocas referencias sobre el estado nutrimental de los pinos. Touzet (1987), reporta intervalos de suficiencia para pinos escoceses y para todos los pinos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Valores de referencia para necesidades de contenidos nutrimentales en pinos escoceses y para todos los pinos.

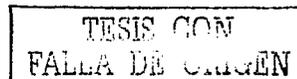
	Pinos escoceses (Gussone, 1964)*			Todos los pinos (Zottl, 1973)*		
	Límite de deficiencia	Crecimiento óptimo	Deficiencia extrema % en materia seca	Deficiencia	Suficiencia**	Crecimiento óptimo
N	0.7 - 1.6	1.8 - 3.2	0.8	1.2	>1.2 a <1.5	1.5 - 2.2
P	0.06 - 0.10	0.20 - 0.30	0.06	0.09	>0.09 a <0.13	0.13 - 0.20
K	0.30 - 0.45	0.55 - 0.90	0.30	0.5		0.60 - 1.20
Ca	0.05	0.05 - 0.24	0.02	0.05		0.10 - 0.50
Mg	0.05 - 0.09	0.06 - 0.13	0.02	0.05		0.10 - 0.20
	mg kg ⁻¹ de materia seca					
Fe				30		45 - 200
Mn	6 - 7	20		4		20 - 800
Cu				2		4 - 6
Zn				5		10 - 80
B				10		15 - 35

*Citados por Touzet, 1987.

** Propuesto por el autor.

Uno de los parámetros importantes en la nutrición de las plantas es el balance entre N y P, que determina el uso eficiente de ellos. La relación N/P a nivel foliar permite determinar si hay suficiencia o deficiencia de los dos más importantes elementos en la nutrición de las plantas. La relación teórica más importante entre estos nutrimentos, para la mayoría de las plantas cultivadas, se encuentra entre 10:1 y 14:1. Una relación mayor puede representar una deficiencia de P lo cual limita el crecimiento de las plantas. En especies forestales, se debe conocer aún estas relaciones para determinar las más favorables.

2.4.3 Propiedades bioquímicas



Actividad enzimática en el suelo

Los procesos por los cuales la fase orgánica del suelo se transforma en sustancias minerales simples, son catalizados por enzimas que son secretadas por las raíces de las plantas, algunos microorganismos y la misma fauna del suelo (Herbien y Neal, 1990). Estos compuestos de origen biológico son catalizadores específicos que aumentan la velocidad de una reacción bioquímica y se caracterizan según Devlin y Witham (1983) porque:

- a) Su actividad se realiza con concentraciones extremadamente pequeñas de estas, aunque la cantidad de sustrato transformado (producto) en la reacción es mucho mayor.
- b) Las enzimas no son afectadas por las reacciones en las que intervienen.
- c) Su actividad queda restringida a un margen de pH, temperatura y concentración.
- d) Su poder catalizador, conduce a la reacción en dirección al equilibrio en muy poco tiempo.
- e) Esta acción catalizadora resulta ser específica de cada enzima.
- f) La interacción enzima + sustrato forma un complejo E-S antes de la descomposición del sustrato.
- g) Su presencia o ausencia se debe a inhibidores o activadores.

Con frecuencia, la proteína enzimática está asociada a un grupo funcional activo no proteínico de menor tamaño que ella, el cual recibe el nombre de grupo prostético.

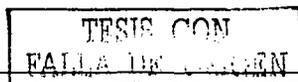
La primera etapa en una reacción enzimática es el acoplamiento de la enzima con una molécula del sustrato para formar un complejo llamado enzima- sustrato.

En la segunda etapa este complejo debe disociarse para liberar una el producto deseado. La enzima libre es regenerada y se habilita para reaccionar nuevamente con otra molécula del sustrato (Pauling, 1956, citado por Hopkins, 1995).

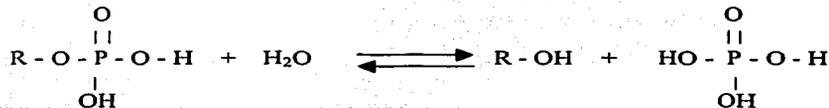
La actividad de las enzimas al catalizar las transformaciones químicas es muy considerable, ya que puede bastar una sola molécula para catalizar la reacción de varios millones de moléculas del sustrato (sustancia reaccionante) por minuto. La enzima acelera la reacción combinándose con el sustrato y disminuyendo la barrera de energía (energía de activación) que las moléculas de dicho sustrato deben superar para transformarse en el producto de la reacción (Bonner y Galston, 1975).

El nombre general de fosfatasas ha sido usado para describir un amplio grupo de enzimas que catalizan la hidrólisis del P contenido en la materia orgánica, a fosfatos inorgánicos primarios como el $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$ y secundarios como el HPO_4^{2-} para que la planta los tengan disponibles.

Marschner (1995) sugiere que la actividad fosfatásica de la raíz es un factor significativo de la eficiencia nutrimental bajo un limitante suministro de P mineral.



La actividad enzimática de las fosfatasas catalizan la hidrólisis de los ésteres y anhídros del ácido fosfórico (Tabatabai, 1994). La ecuación general de la reacción catalizada por la fosfatasa ácida y alcalina es:



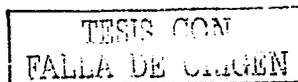
Las fosfatasas son ectoenzimas secretadas por la raíz de las plantas que se encuentran en una situación de estrés por carencia de P. Su actividad es mayor sobre la superficie de la raíz que en el volumen del suelo, éstas enzimas permanecen en el suelo ya sea asociadas con células no vivas o restos de estas, o bien, inmovilizadas en la matriz del suelo, conservando su capacidad hidrolítica (Marschner, 1995).

Tabatabai y Eivazi (1977) y Juma y Tabatabai (1977, 1978) (citados por Tabatabai, 1994) mostraron que la fosfatasa ácida es predominante en suelos ácidos, mientras que la alcalina lo es en los suelos alcalinos. Esta relación de la actividad de las fosfatasas y el pH del suelo sugiere que los rangos de síntesis de estas enzimas y la relación de la enzima con los microorganismos o la estabilidad de la enzima esta relacionada de manera directa con el pH del suelo.

Conclusiones similares obtuvieron Herbien y Neal (1990), con sus trabajos sobre la actividad fosfatásica y el pH, ellos sugieren que la síntesis enzimática y la relación con los microorganismos del suelo y las raíces puede depender del pH, además que la constitución de los organismos secretores de la enzima esta regulada por el pH del suelo y que la estabilidad enzimática, así como su conformación está influenciada por este.

La actividad de una enzima en el suelo es el resultado de la reserva o acumulación de la enzima, de la excreción de las raíces y de la proliferación de microorganismos con la capacidad de sintetizarla, (Tabatabai, 1994).

Actualmente y por las características que esta presenta la actividad enzimática puede utilizarse como un indicador potencial bioquímico y biológico de la calidad del suelo.



2.4.4 Propiedades biológicas

Poblaciones microbianas

La naturaleza microscópica de la mayor parte de los habitantes edáficos es la razón fundamental que explica la facilidad con que puede pasar inadvertida la variada, compleja y continua actividad de los microorganismos vivos presentes en el suelo.

El pequeño tamaño de los organismos edáficos queda, sin embargo, compensado por su presencia en un número muy elevado, por lo que, en definitiva, el resultado de la actividad biológica es fundamental en el comportamiento del suelo. Sin la actividad vital interrelacionada de la microflora y microfauna, el suelo se convertiría en un depósito en que se acumularían las plantas muertas sin posibilidad de reciclar los elementos nutritivos, como C, N y P, necesarios para el crecimiento y desarrollo de la vegetación.

Los suelos contienen una amplia variedad de formas biológicas, con tamaños muy diferentes, el grupo conocido con el nombre de microorganismos incluye, arbitrariamente, los organismos invisibles individualmente para el ojo humano que necesita la ayuda del microscopio óptico para su apreciación visual. En este grupo se encuentran las bacterias, actinomicetos, hongos, algas y protozoos (Harris, 1992).

Los microorganismos del suelo son muy sensibles a las perturbaciones que sufre el ecosistema por lo que resultan un buen indicadores de la calidad del suelo (USDA, 1998). Los cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo como resultado de practicas de uso del suelo repercuten en las condiciones de la matriz del suelo que es la que soporta a las poblaciones microbianas, por lo que es de esperarse la diferencia contrastante en la población microbiana y su actividad de un suelo labrado a uno natural. Usualmente el número de poblaciones microbianas decrece a medida que aumenta la intensidad del laboreo (Konopka y Turco, 1991, citado por Turco *et al.*, 1994), en especial las poblaciones fúngicas decrecen más rápidamente que las bacterianas (Holm y Jensen, 1980, citado por Turco *et al.*, 1994).

El conocimiento limitado del desempeño que tienen las poblaciones microbianas es un reflejo de dos problemas específicos: la falta de un conjunto común de indicadores biológicos y la realización de un índice que refleje la magnitud e interacción de la porción biológica del suelo, lo que permitiría conocer e incorporar el componente microbiano a la determinación de la calidad del suelo (Turco *et al.*, 1994).

Los métodos existentes para determinar la distribución espacial de los microorganismos edáficos son escasos, la técnica de Rossi- Choldodny aunque permite obtener sólo interpretaciones limitadas, una de las bondades que presenta es que la superficie del portaobjetos es continua e impermeable facilitando la condensación de humedad con lo que se puede revelar la morfología de organismos que se desarrollan en las condiciones naturales del suelo y como está en contacto con las superficies de los agregados, puede imitar en alguna forma las condiciones naturales de estas superficies. No es un método cuantitativo y sin embargo tiene gran interés por su contribución para interpretar la distribución espacial (Harris, 1992).

El tamaño de las colonias microbianas, y especialmente las bacterianas, puede tener significado ecológico, ya que puede esperarse que la actividad combinada de muchas células en estrecha proximidad presente mejor resultado bioquímico y degradador que el de una célula aislada. La existencia de grandes colonias puede considerarse, también una consecuencia de la disponibilidad de nutrimentos, pues el desarrollo de una colonia con muchos cientos de células solamente puede producirse si existen suficientes recursos nutritivos para permitir esa tasa de crecimiento (Harris, 1992).

Actividad microbiana

El conteo de las poblaciones microbianas nos proporciona información interesante de estas poblaciones en el suelo. Pero para el manejo de un suelo esta técnicas no presenta aspectos de gran interés de las poblaciones microbianas. Por esta razón, los estudios de microbiología edáfica deben centrarse principalmente en dos aspectos: conocimiento de la cantidad total de microorganismos presentes en el suelo (biomasa) y la actividad de estos.

La biomasa microbiana se define como la parte viva de la materia orgánica del suelo, excluyendo las raíces de las plantas y los animales de tamaño superior al de las mayores amebas ($5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$) (Harris, 1992; USDA, 1997).

La influencia de la humedad en el suelo sobre la actividad microbiana se debe al efecto que el espesor de la película de agua tiene sobre la movilidad de los organismos en especial en las bacterias, la extracción de los nutrimentos de esta película y la saturación de los poros del suelo de O_2 , por consecuencia en el suministro de este para los microorganismos y a la concentración de CO_2 en su entorno (Harris, 1992).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Desecando el suelo y rehumedeciéndolo después, se originan oleadas de producción de CO_2 , NH_4^+ y NO_2^- siempre que una proporción significativa de la primitiva población microbiana haya sobrevivido. Se ha comprobado que la oleada de CO_2 suele durar entre cinco y diez días y que, cuanto más intensa haya sido la sequía, más tiempo haya permanecido el suelo seco o más elevado sea el contenido de materia orgánica, es mayor la intensidad de este flujo. Además, un suelo puede secarse y rehumedecerse muchas veces y en cada rehumentación, se produce un nuevo flujo de intensidad ligeramente inferior a la del precedente (Shan-Min, *et al*, 1987; Harris, 1992).

Otro de los factores que afectan la actividad de los microorganismos del suelos es la temperatura, Harris (1992) indica que la actividad metabólica de los organismos se inicia cuando se supera un determinado umbral térmico; aumenta a medida que las temperaturas se elevan hasta cierto valor máximo y después se reduce rápidamente cuando la temperatura supera este valor. De igual manera los diferentes organismos presentan su máxima actividad y crecimiento rápido a distintas temperaturas.

2.5 Análisis estadístico multivariado (AEMV)

Los métodos estadísticos multivariados transforman y presentan de una forma nueva los numerosos datos iniciales, además de reducirlos sin perder demasiada información, hasta constituir un resumen relativamente exhaustivo del conjunto de partida, habitualmente complejo y con información redundante (Pérez, 1996).

Los AEMV son extraordinariamente útiles por su ayuda para hacer que tengan sentido grandes conjuntos de datos complicados y complejos de diversas variables, expresadas en diferentes unidades.

Muchas técnicas multivariadas tienden a ser de naturaleza exploratoria en lugar de confirmatoria. Es decir, muchos métodos multivariados tienden a motivar hipótesis en vez de probarlas. Lo que resulta de gran utilidad cuando se tiene una gran cantidad de datos y la pregunta es, si pudiera haber una información valiosa en ellos. Muchos de estos métodos ayudan a crear nuevas variables que tengan propiedades deseables.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.5.1 Análisis de componentes principales (ACP).

Entre los AEMV, se encuentra el análisis de componentes principales (ACP). El ACP es una técnica de reducción de la información disponible sobre un conjunto de individuos, de los cuales se han tomado diversas observaciones sobre varias de sus características (Pérez, 1996). La razón más importante para realizar un ACP, es su uso como herramienta para cribar datos de variables múltiples.

Otro objetivo del ACP es identificar nuevas variables significativas o de mayor robustez (VR) subyacentes. El ACP también es útil siempre que el investigador desee agrupar las unidades experimentales en subgrupos de tipos semejantes (Johnson, 2000).

Todos los análisis de componentes principales derivan de una matriz de correlación (Herrera, 1994, citado por Garrido, 2003). Dentro de un ACP en el proceso de reducción de la dimensionalidad, de la cantidad de datos, se debe conservar la información, es decir, las diferencias entre las observaciones que se miden mediante la varianza y eliminación de las redundancias o reiteraciones, que se estiman por las covarianzas y aún mejor, por las correlaciones. Por ello, se trata de encontrar una transformación que diagonalice la matriz de varianzas-covarianzas o alternativamente, la matriz de correlaciones (Rencher, 1995).

Supongamos que disponemos de N sitios, con p parámetros diferentes de los mismos; es decir, disponemos de N vectores *p*-dimensionales de datos de la variable estadística p -dimensional $X = (X_1, \dots, X_p)$. El objetivo del método de los componentes principales consiste en reducir la dimensionalidad de la variable X , para construir una nueva variable $U = (U_1, \dots, U_r)$, con $r < p$, cuyas componentes U_i sean combinaciones lineales de las X_i , y de manera que expliquen una proporción suficientemente grande de la dispersión total contenida en los datos originales. Se trata, por tanto, de sintetizar al máximo la información con el criterio de pérdida mínima de capacidad explicativa en cuanto a la varianza total de las series (Pérez, 1996).

Los datos de los parámetros observados vendrán dados por la matriz X :

X ₁₁	X ₂₁	X _{p1}
X ₁₂	X ₂₂	X _{p2}
.....
X _{1N}	X _{2N}	X _{pN}

TESIS CON
FALLA DE URGEN

Podemos suponer, sin pérdida de generalidad, que las variables originales (VO) están centradas; o sea:

$$\bar{X}_i = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, p$$

Sea S, la matriz de covarianzas:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\text{Donde } C_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ik} X_{kj}$$

$$i, j = 1, 2, \dots, p$$

y cuyos elementos diagonales son las varianzas de cada una de las p variables. La suma de todas ellas, o traza de la matriz S, nos da la medida de la dispersión total de los datos.

El proceso a seguir en el ACP es el siguiente. La primera nueva variable o componente 1:

$$U_1 = b_{11}X_1 + b_{12}X_2 + \dots + b_{1p}X_p$$

se construye buscando el vector $b = (b_1, \dots, b_p)$ que, de entre todos los que tienen módulo unitario, atribuya a U_1 , la mayor varianza posible, de manera que esta nueva variable constituya la mejor explicación unidimensional de la varianza total contenida en los datos.

Puede demostrarse que el vector b buscado es uno de los autovectores de la matriz S, concretamente el asociado al mayor autovalor de S ($v_1 = \text{Máx}(I_1, \dots, I_p)$). La proporción de la varianza total explicada por la nueva variable U_1 viene dada por la expresión $v_1 / (I_1 + \dots + I_p)$.

La segunda nueva variable o componente 2:

$$U_2 = b_{21}X_1 + b_{22}X_2 + \dots + b_{2p}X_p$$

se construye buscando el vector que, de entre todos los que tienen módulo unitario, atribuya a U_2 la mayor varianza posible, de manera que esta nueva variable esté no correlacionada con U_1 y sea ortogonal a U_1 .

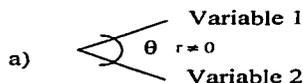
Puede demostrarse que el vector buscado es uno de los autovectores de la matriz S, concretamente el asociado al segundo mayor autovalor de S. La proporción de la varianza total explicada por las variables U_1 y U_2 conjuntamente viene dada por la expresión $(v_1 + v_2) / (I_1 + \dots + I_p)$. Procediendo así sucesivamente, se construyen los componentes principales restantes. Es frecuente que pocos componentes principales expliquen una proporción muy elevada de la varianza, con lo que la reducción de dimensionalidad conseguida rápidamente es considerable.

Los componentes principales también se pueden obtener de las variables estandarizadas:

$$Z_1 = \frac{X_1 - \mu_1}{\sqrt{\sigma_{11}}}, \quad Z_2 = \frac{X_2 - \mu_2}{\sqrt{\sigma_{22}}}, \dots, \quad Z_p = \frac{X_p - \mu_p}{\sqrt{\sigma_{pp}}} \quad (\text{Cervantes y Rivera, 1993})$$

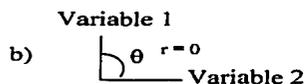
Para el análisis e interacción de los componentes principales debe tenerse en cuenta los siguientes axiomas de los cosenos;

a) si se considera a cada **parámetro** (para nuestro caso, propiedad del suelo) como un vector de resultados, se tiene que, dadas dos variables en las que su correlación sea diferente de cero (correlacionables):



entonces; su efecto es multiplicativo por que existe entre ellas una interacción o una variación conjunta (caso de las variables originales).

Sin embargo, cuando las variables son ortogonales y su correlación es cero (no correlacionables):



entonces la variación conjunta, también es cero (caso de las variables estandarizadas) y su efecto conjunto es aditivo (Rivera, 1991).

Para decidir que componentes principales excluir, con el objeto de reducir la cantidad de datos, se debe cumplir que:

1. Los componentes requeridos puedan explicar preferentemente un 90% de la variabilidad total.
2. Excluir aquellos componentes cuyos valores propios asociados sean menores que la media (eigenvalores menores a 1, si se han utilizado variables estandarizadas).

3. Escoger los componentes principales requeridos para que todas las variables queden convenientemente representadas, es decir, con los r componentes principales elegidos, expliquen un porcentaje elevado de su variabilidad (sea cercana a 100) (Rencher, 1995).

El objetivo de reducción, es en realidad intentar descubrir la verdadera dimensionalidad de los datos. Esto es, si los datos se sitúan en un espacio p -dimensional, estos podrían tomar p dimensiones, pero en caso contrario y aunque se midan p variables, la dimensionalidad real de los datos es menor que p , las variables originales se pueden sustituir por un número menor de variables subyacentes, sin que se pierda información. Entonces, se puede usar esta menor cantidad de variables en los siguientes análisis.

Resulta muy bueno, cuando es posible, dar significado a las variables recién creadas o componentes principales, aunque esto no siempre es factible y mucho menos fácil (Johnson, 2000).

2.5.2 Análisis de cluster (ACT)

El análisis de cluster (ACT) es otra técnica multivariada. Un cluster es un conjunto de entidades con características similares que pertenecen a una población estadística. Si cada entidad se representa como un punto en un espacio geométrico de prueba, la distancia entre dos puntos de un cluster es menor que la distancia entre un punto en el cluster y otro fuera de este. El objetivo es agrupar estas unidades de datos en clusters tales que los elementos dentro de un cluster tengan una "asociación natural" entre sí y todas aquellas excepciones queden en cluster diferentes (Ocegeda, 1991).

Del análisis jerárquico de los cluster, los aglomerativos, empiezan el análisis con tantos grupos como individuos haya y se van formando grupos de forma ascendente, agrupando a los sitios. Entre estos métodos se pueden citar el método de la media, el del centroide, el método de las distancias máximas, el método de las distancias mínimas y el método de la mediana.

El análisis de cluster está orientado hacia la síntesis de la información aportada por los elementos muestrales con vistas a establecer una clasificación entre ellos en función de su mayor o menor homogeneidad. A diferencia del análisis de discriminantes, en el que las clases están previamente establecidas, el análisis de conglomerados o cluster, va formando las clases a medida que va agregando los elementos más homogéneos y es incluso frecuente que ni siquiera el número de clases a establecer esté determinado de antemano (Pérez, 1996).

3. PROBLEMÁTICA

3.1 Antecedentes

A nivel nacional no son muchas las referencias respecto al estudio del suelo y su calidad en zonas naturales, con un enfoque de sustentabilidad. Entre los revisados se encuentran; Estudio de las relaciones entre la vegetación forestal, el suelo y algunos factores climáticos en seis sitios del declive occidental del Iztaccihuatl (Anaya, 1962), La vegetación alpina y subalpina del declive occidental del volcán Popocatepetl, México (Escamilla, 1996), Producción de hojarasca, dinámica del mantillo, descomposición foliar y potencial microbiano del suelo, en tres comunidades contrastantes del desierto sonorense (Núñez, 1998), Indicadores de calidad del suelo en tres cronosecuencias de bosque mesófilo, sierra norte, Oaxaca (Bautista, 2001), Indicadores de calidad del suelo, estado nutrimental y calidad de fruto en huertos de aguacate cv. Hass con manejo orgánico e integrado (Castillo, 2002).

3.2 Justificación

A la luz de la Ecología, de manera natural se desarrollan diversas relaciones entre factores edáficos y climáticos con la abundancia y distribución de los organismos en un área determinada. Lo anterior ha sido y es resultado de procesos que tienden a la máxima eficiencia y homeostasis del sistema. Sin embargo, este equilibrio se va alterando por agentes externos y particularmente por las actividades humanas que representan la principal fuerza de alteración, que degrada al suelo, a la vegetación y a las comunidades faunísticas de los ecosistemas.

En el país, los bosques de coníferas ocupan el 15% del territorio, de esto el 90% son bosques de pino, o bien, de pino en asociación con *Quercus*, *Juniperus* y *Abies* y todos ellos han sido fuertemente alterados por actividad del hombre. El Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl no es excepción de lo anterior pues en él se desarrollan actividades económicas como extracción de madera, pecuarias como la cría de ganado vacuno y recreativas excursionismo y montañismo entre otras, que tienden a la degradación del suelo y que repercuten en su calidad.

Hoy en día es necesario contar con un inventario completo y confiable de las condiciones y el estado de conservación en que se puede encontrar a los recursos del bosque y principalmente al suelo, por la importancia que tiene este recurso para dar soporte y garantizar la buena salud del subsistema biótico.

Con este estudio se hacen investigaciones cuyas aportaciones contribuyen a evaluar la calidad del recurso suelo y por la importancia en abundancia y diversidad que tiene el género *Pinus*, también se contribuye a determinar su estado nutrimental en el PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Evaluar calidad del suelo y estado nutrimental de especies forestales, también como parámetro de calidad del suelo, son un estudio imprescindible para realizar un aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y de los bosques adyacentes y circunscritos al Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, ya que es la zona de la periferia del parque la que recibe la mayor presión antropogénica y que por su ubicación geográfica y altitudinal, es una zona de captación de agua atmosférica e importante reservorio de ella, además de su importancia por la gran captación de CO₂ y por ser hábitat de un gran número de especies vegetales y animales, por lo que es importante su mantenimiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. HIPÓTESIS

En virtud de que las zonas forestales del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl, al estar sujetas a una fuerte presión antropogénica, reciben de ésta una influencia negativa que tiene efecto directo sobre la calidad de los recursos, en los que el suelo, es receptor final del impacto ambiental generado y es resultado de la interacción del material parental con el clima, la topografía y la biota en el tiempo; con lo anterior se plantean las siguientes.

Hipótesis:

- La MOS, el pH y la textura están entre los mejores indicadores de la calidad del suelo.
- La calidad del suelo en términos de condiciones de sitio para la productividad vegetal forestal, tiende a ser menor en los límites del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl, como consecuencia de la cercanía con los asentamientos humanos.
- De la mayor calidad del suelo, depende un mejor estado nutrimental del género *Pinus* en términos de balance y proporción de nutrimentos en tejido foliar.

Objetivos

General.

Determinar los mejores indicadores de calidad del suelo y la relación de ésta con el estado nutrimental del género *Pinus*, en un gradiente altitudinal de la zona occidente, de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl.

Particulares.

1. Determinar los parámetros físicos, químicos, biológicos y bioquímicos (pH, conductividad, color, textura, densidades real y aparente, % de humedad, contenido de materia orgánica, actividad microbiana y enzimática, N_{-total}, P_{disponible}, Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺) del suelo que sirvan como indicadores de su calidad.
2. Determinar la concentración de N_{-total}, P_{-total}, Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ en muestras foliares del género *Pinus* y la reserva de estos nutrimentos contenida en el mantillo.
3. Obtener un índice de calidad para suelos de la zona.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción de la zona de trabajo.

5.1.1 Características del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

El área de estudio es una zona de influencia para el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, por lo que se debe tomar en cuenta como referencia lo siguiente:

Superficie.

El parque ocupa aproximadamente 25, 679 hectáreas. Colinda al Norte y Oeste con el Estado de México (municipios de Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatingo), al Este con Puebla (San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochmilco) y al Sur con Morelos (Tetela del Volcán).

Ubicación geográfica.

Geográficamente se localiza entre los meridianos de coordenadas 98 35' y 98 42'40" de longitud oeste y entre los paralelos de 18 59' y 19 15'30" de longitud norte (Vargas, 1984). El área se localiza sobre el Sistema Neovolcánico Transversal, la topografía del lugar comprende a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. EL Izta-Popo se encuentra en el Sistema Orográfico Sierra Nevada, originado durante el Terciario por actividad volcánica (Figura 5).

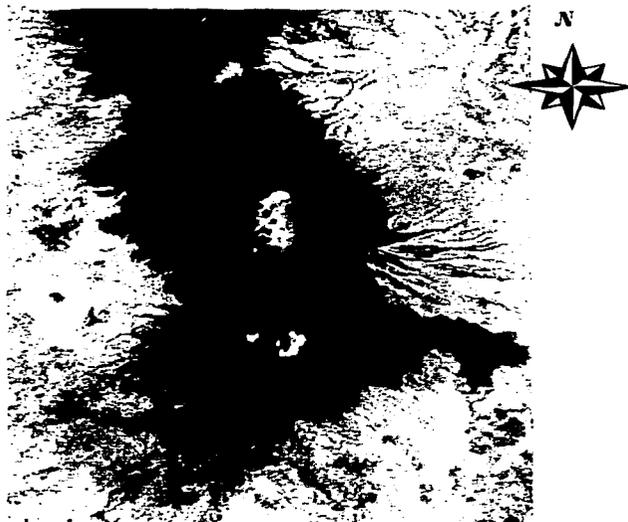


Figura 5. Imagen satelital del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Suelos.

Los tipos de suelos aflorantes en esta zona son el regosol dístico, los litosoles, el andosol mólico y el cambisol eútrico.

Hidrografía.

Se localizan cuatro ríos (Amecameca, Molinos, Akal y Atila) así como escurrimientos perennes menores.

Clima.

Presenta dos tipos de clima: ETH Muy frío, lluvias en verano, temperatura media anual menor de -2°C , la del mes más caliente menor de 0°C .

C (w'2) (w) cig semifrío subhúmedo, temperatura media anual de 5 a 12°C , mes más frío de 3 a 18°C .

Altitud.

La cumbre del Iztaccíhuatl se encuentra a los 5283 msnm, mientras que la del volcán Popocatepetl es ligeramente mayor ya que alcanza una altura de 5451 msnm su cráter es elíptico y tiene un eje mayor que va de los 850 a los 750 m de diámetro con una profundidad de 300 metros.

Tipos de vegetación

Bosque de pino, oyamel, páramo de altura y zacatonal. La vegetación que se encuentra en el Estado de Morelos es: *Pinus hartwegii*, *P. ayacahuite*, *P. michoacana cornuta*, *P. pseudostrobus*, *P. macrocarpa*, *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyi*; en sitios de mayor altitud se localiza el *Pinus oocarpa*, en altitudes entre 2700 y 3200 msnm; en altitudes de 3000 a 3500 metros se localiza la siguiente vegetación: *Pinus lawsoni*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pringlei* y *P. teocote*; así como las especies de encino: *Quercus mexicana*, *Q. crassipes*, *Q. rugosa* y *Q. macrophylla*; otras especies de árboles forestales: *Clethra mexicana*, *Arbutus xalapensis*, *A. glandulosa*, *Arctostaphylos arguta*, *Buddleia cordata*, *B. americana* y *Dodonaea viscosa*.

En altitudes de 3200 a 4250 metros se encuentra vegetación herbácea como son: las gramíneas *Muhlenbergia*, *Sporobolus*, *Festuca* y *Stipa*; también son frecuentes las dicotiledóneas como: *Lupinus* y *Penstemon*, a partir de los 4250 m de altitud se inicia la vegetación de pastizal alpino y las nieves perpetuas.

Del Estado de México: *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *Quercus laurina*; otras especies son: *Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Ilex toluicana*, *Meliosa dentata*, *Oreopanax xalapensis*, y *Prunus brachybotrya*. Vegetación de zacatal: *Festuca toluicensis*, *F. livida*, *F. amplissima*, *Calamagrotis toluicensis*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Trisetum spicatum*, *Agrostis toluicensis* y *Poa orizabensis*. Del Estado de Puebla: sólo podemos mencionar que existen *Pinus ayacahuite*, *Alnus mexicana*; bosques de oyamel, bosques de pino, bosques de pino-encino y zacatal (SARH, 1993).

5.1.2 Delimitación de la zona de estudio

El área de estudio comprende algunas zonas comunales y ejidales de los municipios de Amecameca, Atlautla y Tlalmanalco adyacentes a los terrenos de la exposición occidente del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl, dichas zonas presentan grandes dimensiones por lo que fue necesario determinar los sitios de muestreo con el apoyo de mapas topográficos y fotografías aéreas. Con ello se definieron regiones homogéneas (unidades ambientales, que fueron denominadas; O, con dominancia de oyamel; F, faceta y D, zona de disturbio notable) que a su vez son diferentes a otras regiones adyacentes a éstas.

La delimitación de estas unidades ambientales, se hizo con base en un criterio topográfico y por la distribución altitudinal de las especies del género (Figura 6).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

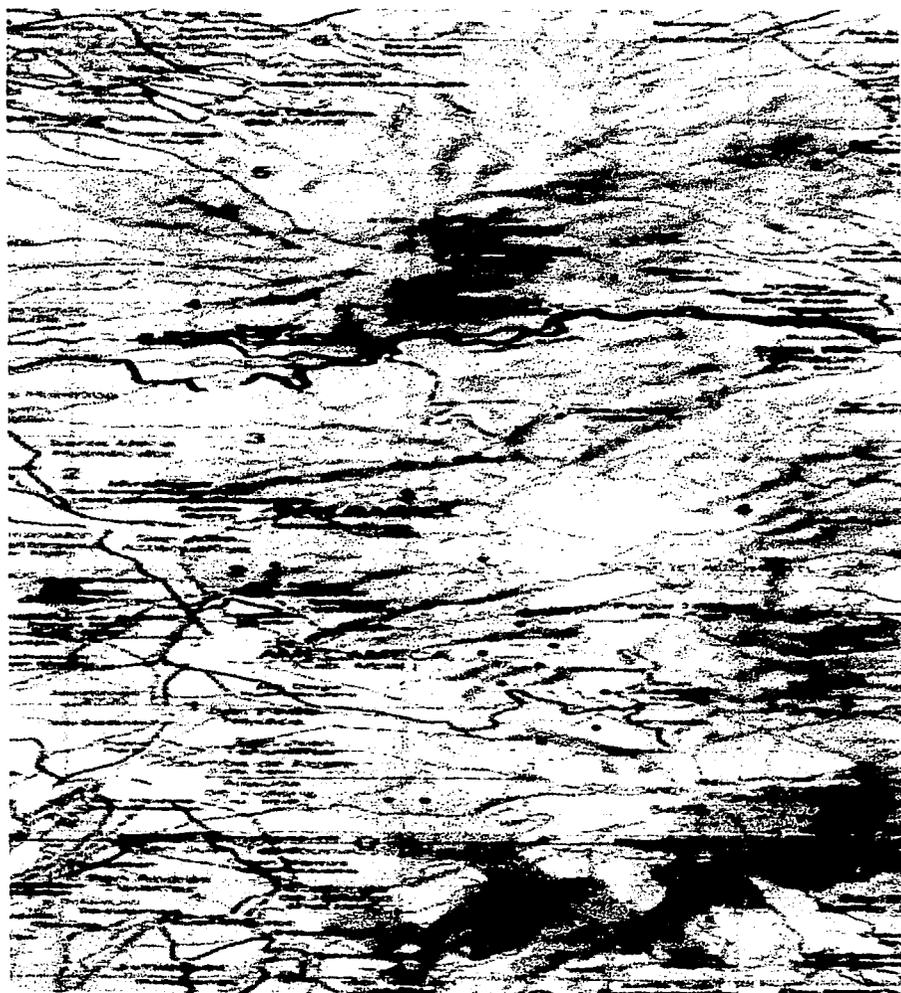


Figura 6. Zona de estudio (en rojo los sitios de observación).

Con ayuda de un mapa topográfico se localizaron dichas unidades ambientales y se procedió a realizar el muestreo. Para cada sitio se tomaron los siguientes datos de campo:

- * Fecha de colecta
- * Lugar de colecta
- * Altitud
- * Exposición
- * Pendiente
- * Vegetación arbórea dominante

5.2 Toma de muestras

5.2.1 Muestras de suelo.

A. Indicadores físicos y químicos

Para el análisis físico y químico del suelo, se tomaron con una pala, cuatro submuestras de 0-20 cm de profundidad, con aproximadamente 1 kg de peso y que representaban la misma sección del perfil (mismo horizonte). Cada submuestra fue tomada de un sitio lo menos perturbado posible, es decir, alejado de zonas de cultivo, sin excretas, caminos o veredas. Las submuestras fueron mezcladas homogéneamente obteniendo así, una muestra compuesta de 2 kg de peso, que se colocó, etiquetó y trasladó en bolsas plásticas al laboratorio para su análisis.

B. Indicadores bioquímicos y biológicos.

Para determinar la actividad microbiana y fosfatásica en el suelo, se tomaron con la ayuda de una barrena, seis submuestras de 0-10 cm de profundidad. Se mezclaron para formar una muestra compuesta, la cual se traslado en frascos de plástico con cierre hermético debidamente etiquetados (Atlas y Bartha, 1987) (Figura 7).

5.2.2 Muestras foliares

Se seleccionaron cuatro individuos de la especie o especies (Calderón y Rzedowski, 2001), presentes en la unidad visitada, la selección se realizó con base a la edad de los árboles dominantes en el sitio, excluyendo aquellos que presenten plaga, ocoteo o incendio y se procedió a cortar hojas que correspondían a los dos últimos años de crecimiento, ya que en estas se

encuentra el mayor contenido de nutrimentos. Estas hojas se trasladaron en bolsas de papel de estraza.

5.2.3 Muestras de mantillo

Se tomaron cuadrantes de 1 m², en cada uno de los sitios de observación, colectando el mantillo depositado en el cuadrante (Figura 7).



a



b



c



d

Figura 7. Toma de muestra; (a) foliar, (b) suelo 0-20 cm, (c) suelo 0-10 cm, (d) mantillo

5.3 Pretratamiento de muestras

Previo al análisis físico y químico del suelo, la muestra se seco al aire en un lugar libre de contaminantes. Una vez seca, se paso por un tamiz con malla de 2 mm de abertura y se envaso en frascos de polietileno.

En el caso de los parámetros biológicos y bioquímicos se mantuvieron en refrigeración a 4°C, con el fin de mantener en condiciones óptimas a las enzimas y reducir al máximo el metabolismo microbiano en la muestra (Ross, 1989). Para la determinación de actividad enzimática, se procedió a un secado y tamizado igual al realizado en las muestras de suelo para su caracterización, a fin de eliminar restos de materia orgánica o raíces y fragmentos minerales gruesos.

Las muestras foliares se secaron a una temperatura aproximada de 65-70°C, en una estufa marca FELISA modelo FE131, hasta obtener peso constante. Ya seca la muestra, se paso por un molino Thomas Scientific y se tamizó en una malla del número 20 del propio molino. Y se almaceno en frascos de polietileno.

5.4 Determinación en laboratorio.

5.4.1 Análisis físicos y químicos en suelo.

La determinación de los parámetros del suelo se hizo de la siguiente manera:

- pH activo relación suelo:agua 1:2 por el método potenciométrico (Jackson, 1964).
- pH potencial en solución salina de KCl 1N en relación 1:2, por el mismo método que el activo.
- Conductividad de la solución del suelo relación 1:5, con un conductímetro (Richards, 1990).
- Color de acuerdo con las tablas Munsell (Munsell, 1975).
- Textura por el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1963, citado por Palmer y Truoch, 1989).
- Densidad real por la técnica del picnómetro y la aparente por la técnica de la probeta (Domínguez y Aguilera, 1982).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Materia orgánica por el método de Walkley y Black (Walkley y Black, 1934, citados en Jackson, 1964).
- Porcentaje de nitrógeno total por el método semimicro-Kjeldahl (Bremmer, 1965).
- Fósforo extractable por el método de Bray y Kurtz (Bray y Kurtz, 1945) (Anexo 1).
- Extracción de cationes intercambiables (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) con acetato de amonio 1N y posterior cuantificación por absorción atómica (Chapman, 1965).

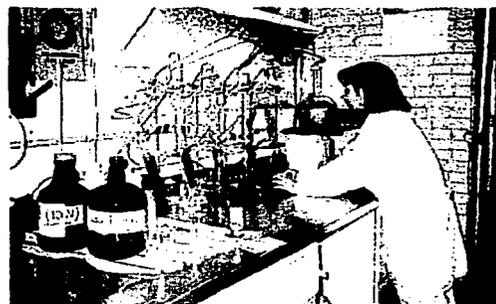


Figura 8. Determinación del N-total por el método semimicro-kjeldahl.

5.4.2 Análisis bioquímico y biológicos en suelo

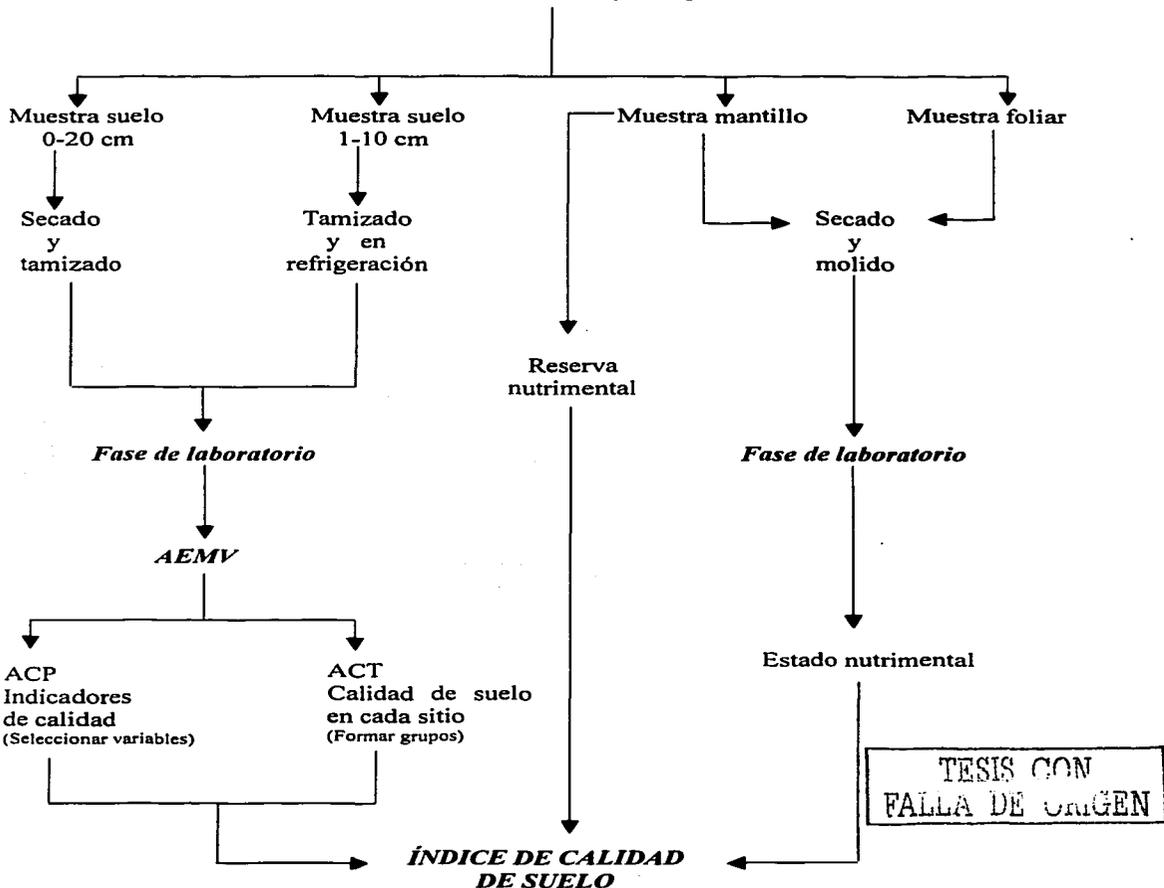
- Actividad de las enzimas fosfatasa ácida y alcalina por el método del p-Nitrofenilfosfato (Tabatabai, 1994) (Anexo 2).
- Actividad microbiana por evolución de bióxido de carbono (Powlson *et al.*, 1987).
- Estimación de la cantidad de carbono en la masa microbiana por el método de fumigación-incubación (Powlson *et al.*, 1987, Shan-Min, *et al.*, 1987, modificado por Cruz-Flores y Granados, 2002 (comunicación personal) (Anexo 3).
- Estudio de la población microbiana del suelo, método de la placa de Rossi y Cholodny (Atlas y Bartha, 1987).

5.4.3 Análisis químicos en tejido vegetal

- Nitrógeno total, por el método semimicro-Kjeldahl (Bremmer, 1965).
- Fósforo total, por el método Vanadato-molibdato (Allan, 1971).
- Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , por digestión ácida del tejido vegetal y cuantificación por absorción atómica (Allan, 1971).
- Se hizo la referencia del estado nutricional de los pinos del PN Iztaccihuatl –Popocatepetl basados en los estándares citados por Touzet, 1987 (Cuadro 5).

Diagrama de flujo de la investigación

Determinación de unidades ambientales en un gradiente del declive occidental del PN Iztaccihuatl-Popocatepetl



6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los resultados de este trabajo se encontró que en la zona de estudio, se tiene un mosaico edáfico que se distribuye en un escalonamiento más o menos estricto y cuyos suelos están asociados con diferentes comunidades boscosas a lo largo del gradiente altitudinal estudiado (2650 - 3723 msnm). Las comunidades forestales presentes en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, fueron descritas en cada lugar, se evaluaron algunas características del suelo y con ayuda de la carta edafológica a escala 1:50,000, denominada: Amecameca, E14-B41; unidad de clasificación FAO/UNESCO/ 1970, editada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática se determinó el tipo de suelo para cada sitio (Cuadro 6).

Cuadro 6. Caracterización de suelo e información de campo en los sitios de observación en el PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl, de acuerdo a su altitud.

Sitio	Observaciones en campo de cada sitio				Exposición	Vegetación	Grupos de suelos
	Longitud	Latitud	Altitud	Pendiente			
	UTM		msnm	%			
W de D 14 Cañada Tezozolco	2101200	529032	2650	35	W	<i>Pinus montezumae</i>	Andosol húmico + Andosol ócrico + Litosol
Culloxochitla	2114839	527927	2710	10	S	<i>Pinus teocote</i>	Fluvisol déstrico + Cambisol húmico
D 14 NE Cañada Tezozolco	2101950	529850	2800	20	W	<i>Pinus montezumae</i>	Andosol húmico + ócrico + Litosol
Pasiöntitla	2114850	530800	2900	35	W	<i>P. patula, P. pseudostrabus, P. teocote.</i>	Andosol húmico + Litosol + Regosol
O 17 N Lomas San José	2112415	530582	2918	42	S	<i>P. montezumae, P. pseudostrabus.</i>	Fluvisol déstrico + Cambisol húmico
O1 Cañada la Catzada	2108833	533236	3250	65	S	<i>Abies, P. montezumae</i>	Regosol eútrico + Litosol
F 1 Cuchilla Zumpango	2111309	533304	3288	30	W	<i>P. hartwegii, P. pseudostrabus</i>	Regosol eútrico + Litosol
F 5 Cañadas Palo Rechino y el Paraje	2110074	534939	3522	20	NW	<i>Pinus hartwegii</i>	Regosol + Litosol
F 11 Cañada Amalacaxco	2111918	534716	3550	45	E	<i>Abies, P. hartwegii</i>	Regosol eútrico + Litosol
F 2 N Cañada Amalacaxco	2111225	534603	3585	35	SE	<i>Abies, P. hartwegii</i>	Regosol eútrico + Litosol
Coronilla	2117782	533552	3600	35	S	<i>Pinus hartwegii</i>	Andosol húmico + Litosol + Regosol eútrico
Paso de Cortés	2111200	536125	3723	20	NE	<i>Pinus hartwegii</i>	Andosol ócrico / húmico

Como se muestra en el Cuadro 6, se encontró que los grupos de suelo predominantes, son Regosoles y Andosoles principalmente ya que de los sitios visitados el 80 % presentó estos suelos además de otros suelos como Fluvisol, Litosol y Cambisol

6.1 Caracterización de suelo a lo largo del gradiente altitudinal

A lo largo de todo el gradiente altitudinal estudiado, se encontró a los 2600 msnm, a los Andosoles húmicos y ócricos asociados a Litosoles que dan soporte a una comunidad de *Pinus montezumae*, a los 2900 msnm, los Andosoles húmicos, se alternan con Regosoles y Litosoles y se encontró en ellos a las especies de pino son *P. patula*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote*. En los límites de los 3600 y 3723 msnm, se encontraron a los Andosoles húmicos y ócricos, con Regosoles y Litosoles asociados y la vegetación forestal que domina son los *Pinus hartwegii*. Los Andosoles, presentan un horizonte (A) mólico o úmbrico posiblemente situado sobre un horizonte (B) Cámbico o con un horizonte (A) ócrico, sin otro horizonte de diagnóstico. Son suelos jóvenes con perfil AC e incluyen suelos de débil a fuertemente intemperizados (WRB, FAO-ISRIC-ISSS, 1998) (Cuadro 6).

Los Regosoles, son los más abundantes a lo largo del gradiente, a partir de los 2900 msnm y hasta los 3600 msnm, presentes en siete de los sitios visitados son suelos que se desarrollan sobre material no consolidado, generalmente son bien drenados. Su génesis representa material recientemente depositado o expuesto, no presentan horizonte de diagnóstico para clasificarlos en otro grupo de suelos y pueden presentar un epipedón ócrico. Tienen secuencia de horizontes AC. Frecuentes sobre rocas blandas, cretas (roca caliza de color blanco), materiales sedimentarios arcillosos y loess. Proceden de material no consolidado, excluyendo materiales aluviales recientes. Se localizan en malpaíses y serranías como algunos de los sitios que se estudiaron. Estos grupos de suelos equivalen al orden de Entisoles que son suelos muy poco evolucionados. La vegetación natural presente en estos suelos son los bosques *Pinus hartwegii*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*, en asociación con *Abies religiosa* y zacatonal subalpino, estas distribuciones coinciden con las reportadas por Anaya (1962).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Asociados principalmente con los Regosoles y a altitudes superiores a los 3000 msnm se encontró a otro grupo de suelos que son los Litosoles, los cuales presentan una secuencia de horizontes AR, profundidad menor a 10 cm, horizonte A, con gran susceptibilidad a la erosión con fuerte pendiente, alta pedregosidad y poca profundidad efectiva; se caracterizan por presentar una fase inicial en el proceso de formación de suelos. Son suelos desarrollados sobre rocas parcialmente alteradas o sobre material calcáreo o material ígneo extrusivo y con una cantidad limitada de material fino, se caracterizan además por ser suelos que carecen de una profundidad apropiada en las que no se reconocen horizontes de diagnóstico para clasificarlos en otros grupos de suelos, sin embargo pueden presentar un epipedón ócrico sobre material parental. En ellos se encontraron comunidades de *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrabus*, *Pinus patula* y principalmente *Pinus hartwegii* (Figura 9), Escamilla (1996) encontró a esta especie como la dominante en la vegetación subalpina, a partir de los 3400 msnm.

Aunque son frecuentes en los lechos, vegas de ríos o partes bajas y cóncavas de cañadas, solo en dos sitios de observación en altitudes menores a los 3000 msnm se encontraron suelos de tipo Fluvisol en asociación con Cambisoles húmicos.

Los Fluvisoles, son suelos que están formados por acumulación de material aluvial en los primeros 25 cm de su superficie, con depositación constante (estratificación) lo cual les proporciona un buen nivel de fertilidad edáfica, en los sitios estudiados, la vegetación encontrada para los Fluvisoles, fue *Pinus teocote*, *montezumae* y *pseudostrabus*.

Por su parte los Cambisoles, que se caracterizan por presentar un grado mínimo de desarrollo, cuentan con un horizonte B (B-Cámbico). Perfil tipo A₁(B)C en el que el horizonte B es de alteración (FAO, 1994). En ellos están desarrolladas las comunidades de *Pinus teocote*, *P. montezumae* y *P. pseudostrabus* (Figura 9).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

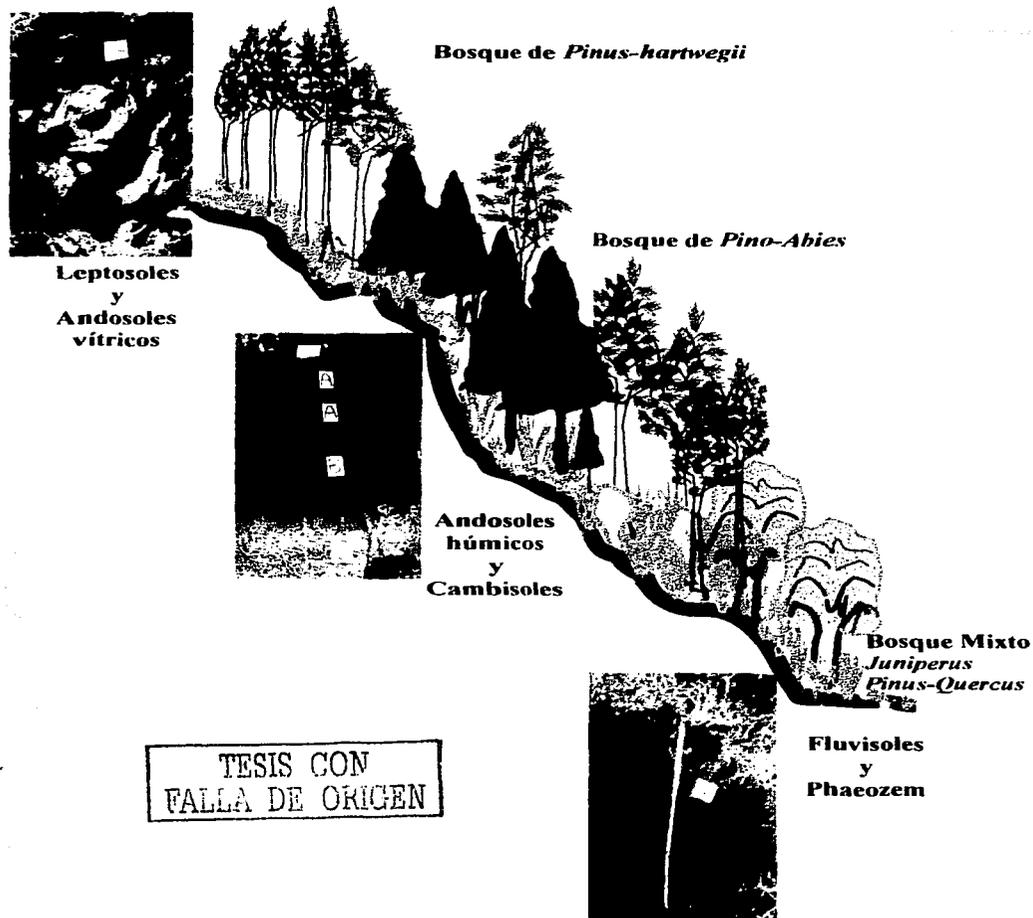


Figura 9. Cadena de suelos y perfil de vegetación en el declive occidental del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

6.2 Indicadores físicos de calidad del suelo

Con el análisis de los parámetros físicos, al medir el pH activo, se encontró que la mayoría de los suelos son moderadamente ácidos, con valores de pH desde 5.4 hasta 6.7 unidades. Es evidente la influencia del pH del suelo sobre la disponibilidad de nutrimentos y la toxicidad de algunas especies químicas para los vegetales (Cruz- Flores, 2003).

En todos los suelos de los sitios estudiados se encontraron poblaciones de individuos del género *Pinus sp* los cuales presentan tolerancia y eficiencia para desarrollarse en suelos muy ácidos (Pritchett, 1991). En estos suelos como en la mayor parte de los forestales, se presenta una reserva sustancial de acidez potencial (pH potencial) que como en los suelos estudiados en esta investigación, se encontró en un intervalo de 3.9 a 5.9 unidades.

Esta tendencia a una mayor acidez, puede atribuirse en parte a la naturaleza del material parental, formado por andesitas; a la descomposición de hojarasca del mantillo en el que predomina la de las Pináceas y también a la precipitación pluvial que en estas zonas supera a los 900 mm al año. Existe una estrecha relación entre el pH activo y el potencial y con los resultados de esta investigación, se encontró que los valores de estas variables se corresponden entre sí (Cuadro 7).

Cuadro 7. Principales propiedades físicas de los suelos en los sitios de estudio.

Sitio*	Propiedades Físicas									
	pH _{Activo}	pH _{Potencial}	CE	DA	DR.	Hum**	EP	Arcilla	Limo	Arena
			dS m ⁻¹	g cm ⁻³				%		
W de D 14	6.1	4.3	0.04	1.33	2.53	1.28	47.49	6	14	80
Cuiloxochitla	6.2	4.9	0.06	0.93	2.17	5.18	57.16	16	26	58
D 14	6.2	4.6	0.04	1.29	2.56	2.08	49.51	4	20	76
Pasiontitla	6.3	5.1	0.04	1.11	2.59	1.76	57.03	6	28	66
O 17	6.4	4.9	0.07	0.97	2.62	3.70	62.91	8	16	76
O 1	6.7	5.9	0.12	0.91	2.20	4.31	58.82	6	22	72
F 1	5.9	4.6	0.04	0.96	1.99	2.54	51.72	8	18	74
F 5	5.4	3.9	0.04	1.03	2.43	2.27	57.65	12	20	68
F 11	5.4	4.2	0.05	1.10	2.21	2.14	50.34	6	24	70
F 2	6.0	4.7	0.07	1.00	2.35	4.23	57.27	6	20	74
Coronilla	5.4	4.0	0.03	0.86	2.05	4.52	58.13	6	20	74
Paso de Cortés	6.0	4.4	0.05	0.90	2.30	4.01	60.87	4	20	76

*Sitios ordenados en forma creciente respecto a la altitud.

** Muestra de 0 - 10 cm de profundidad.

CE; conductividad eléctrica, DA; densidad aparente, DR; densidad real, Hum; humedad, EP; espacio poroso.

En amplia correspondencia con los valores de ligera a extrema acidez (activa y potencial respectivamente), en los suelos estudiados y que representan aceptablemente a los del declive occidental del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl, se encontraron valores de conductividad eléctrica muy bajos (de 0.03 a 0.12 dS m⁻¹) lo que confirma que estos suelos no tienen propiedades sálicas, lo que sirve para corroborar la estrecha y natural relación entre conductividad eléctrica (CE) y pH del suelo.

Los suelos son ligeros y de baja densidad aparente (DA) y con valores entre 0.86 y 1.33 g cm⁻³, estos valores y las texturas determinadas (predominantemente francas) propician un desarrollo radical favorable para los individuos presentes en los sitios estudiados, además se encontró que la porosidad es alta (entre 47 y 62% aproximadamente) lo que favorece una adecuada infiltración o cosecha de agua de estos suelos que tienen una buena capacidad de captación de este recurso.

Las clases texturales dominantes encontradas fueron franco arenosa y arena franca. En la mayoría de los sitios se tuvieron porcentajes de arena altos (con más de 58% en todos los casos), mientras que los porcentajes de arcilla nunca superaron el 16%. En concordancia a estos resultados, Bockheim (1991), reportó que los suelos forestales con vegetación de pinos, oyameles y robles, se caracterizan por sus texturas gruesas.

El porcentaje de humedad fue determinado en muestras de suelo tomadas a una profundidad entre 0 a 10 cm y presentó porcentajes entre 1.28 y 5.18 %, lo cual se ve influenciado por la alta porosidad (mayor de 50%) que tienen estos suelos. Bockheim (1991), también menciona que los suelos forestales, dada su textura y densidad, tienen bajo contenido de humedad. Se encontró una adecuada correspondencia entre las principales fracciones (arena, limo y arcilla), con los valores de densidad real (DR) (valores mayores a 2.0 g cm⁻³, con excepción del sitio F1).

Como resultado del análisis estadístico multivariado (AEMV) realizado a los parámetros físicos, se obtuvieron a partir de diez variables originales (VO), tres componentes principales (CP), definidos cada uno, por una variable más robusta (VR) que el resto de las VO, éstos tres CP explican el 79% de la varianza entre todos los datos de los doce sitios de observación (Cuadro 8).

Cuadro 8. CP del grupo de los parámetros físicos.

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza acumulada
		%	
1	3.73	37.302	37.3
2	2.47	24.702	62.0
3	1.71	17.177	79.2

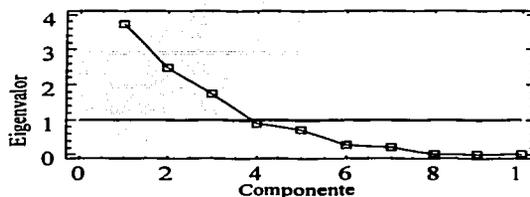


Figura 10. Dispersión de CP (parámetros físicos)

En la Figura 10 se muestra la gráfica de dispersión de 10 CP formados a partir de las variables (parámetros o indicadores) físicas. Juntos los tres primeros, explican el mayor % de varianza entre los datos y tienen eigenvalores mayores a 1, como lo explica (Rencher, 1995), estas son algunas de las propiedades que un CP debe cumplir para seleccionarse. En la construcción de los CP se toman en cuenta todas y cada una de las variables, sin embargo y de acuerdo con Johnson (2000), cada uno de ellos puede interpretarse biológicamente en términos, principalmente, de una y el efecto de ésta puede ser positivo o negativo a la calidad del suelo. De tal manera que el CP uno está definido principalmente por el porcentaje de humedad del suelo (0.42865), el CP dos se define por el pH activo (0.539917) y el CP tres por el porcentaje de arena (-0.518811). Entre otras, estas tres variables resultaron fundamentales para la caracterización de los suelos y proporcionaron información sobre las condiciones físicas del suelo y la repercusión que tienen en la nutrición mineral de las plantas y sobre la actividad microbiana, tomando en cuenta que, para que los nutrimentos estén disponibles, es necesario un pH favorable, que se encuentren en solución, para lo cual se requiere un adecuado % de humedad, variable que a su vez está relacionado con la textura franca de estos suelos.

La fórmula algebraica para determinar a cada uno de los componentes es la siguiente:

$$CP1 = 0.42865 * \%hum + 0.201702 * pHactivo + 0.320939 * pHpotencial + 0.341123 * C.E. - 0.411437 * D.A. - 0.191322 * D.R. + 0.375202 * \% E.P. + 0.228004 * \% Arcilla + 0.253667 * \% Limo - 0.305311 * \% Arena.$$

$$CP2 = -0.0934413 * \%hum + 0.539917 * pHactivo + 0.452138 * pHpotencial + 0.365943 * C.E. + 0.212647 * D.A. + 0.353001 * D.R. + 0.01770068 * \% E.P. - 0.309305 * \% Arcilla - 0.139215 * \% Limo + 0.27613 * \% Arena.$$

$$CP3 = -0.289546 * \%hum + 0.149393 * pH_{activo} + 0.161184 * pH_{potencial} - 0.0902793 * C.E. + 0.346883 * D.A. + 0.257127 * D.R. - 0.241554 * \%E.P. + 0.306752 * \%arcilla + 0.50166 * \%Limo - 0.518811 * \%arena.$$

Nota: Cada vector calculado por el ACP, debe multiplicarse por el valor de cada VO, sin embargo debe tomarse en cuenta que las VO fueron estandarizadas, por lo tanto al sustituirse en la ecuación para cada CP, primero se le debe restar la media aritmética y dividirse entre la desviación estándar (Anexo 4A).

El Cuadro 9, muestra el índice físico de calidad para cada uno de los sitios de observación, el cual se obtuvo con el desarrollo de la ecuación para cada componente y posterior sumatoria de estos y así conocer la calidad del suelo, con base en los parámetros físicos, $ICS_{(físico)} = CP1_{hum} + CP2_{pH act} + CP3_{\%arena}$. Donde $ICS_{(físico)}$ es el Índice de calidad de suelo determinado a partir de los parámetros físicos de los suelos.

Cuadro 9. Índice físico de calidad de suelo.

Sitio	Índice físico de calidad
O 1	5.1476
Cuiloxochitla	3.46499
Pasiontitla	3.441635
O 17	1.42458
F 2	0.246579
D 14	-0.210751
Paso de Cortés	-1.2198346
F 11	-1.839205
F 1	-2.030181
F 5	-2.174308
W de D 14	-2.3017941
Coronilla	-3.949314

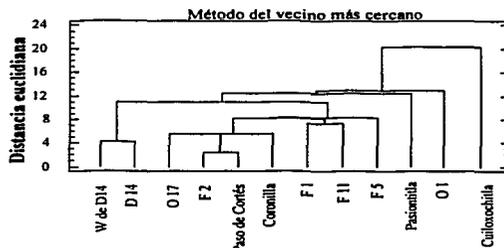


Figura 11. Dendrograma de similitud entre sitios, con base en los parámetros físicos.

Como se mostró en el Cuadro 9, para el índice $ICS_{(físico)}$, el sitio con mejor calidad es el denominado O1, el cual presentó un pH activo menos ácido, lo que sin duda es una característica favorable para aumentar la disponibilidad de los nutrientes. Este indicador es la VR que define al CP dos. En correspondencia con el pH activo, la CE, de este lugar fue también la más alta y para el resto de los indicadores medidos presentó valores adecuados.

El sitio con la menor calidad, respecto a las propiedades físicas es el sitio W de D 14, el cual presentó el menor % de humedad superficial y de EP y mayor de la fracción de arena (1.28, 47.49 y 80 respectivamente, Cuadro 7), por tanto las condiciones para el desarrollo vegetal son menos adecuadas.

Bautista (2001) en un estudio realizado sobre indicadores de calidad del suelo en un bosque mesófilo encontró que el pH, fue una de las variables que definieron al CP uno y señaló a ésta como de alta sensibilidad, además de otras variables, a cambios como consecuencia de perturbaciones. En relación con lo anterior, en éste estudio, el pH puede verse afectado por condiciones asociadas a tipos de vegetación, perturbaciones asociadas con el gradiente altitudinal y su relación a los asentamientos humanos.

En el ACT, se agruparon sitios con base en las similitudes entre los parámetros (menor distancia euclidiana). El dendrograma para parámetros físicos (Figura 11), muestra la agrupación por similitud entre sitios de observación. Lo anterior permite afirmar que el sitio O1, de mayor calidad, se agrupó a los demás sitios hasta el 5° o 6° ciclo de agrupación y el sitio cuiloxochitla que ocupa el segundo lugar en calidad, se unió al final a los demás sitios.

En concordancia con los resultados del ACP, el ACT nos separó a los sitios W de D 14 y O1 (Figura 11), el cual es el penúltimo en agregarse con los demás, lo que apoya la idea de que, O1 fue el sitio con mejor calidad dentro del gradiente altitudinal estudiado.

6.3 Indicadores químicos de calidad del suelo

Se encontró que uno de los parámetros más relacionados con la altitud, fue el contenido de materia orgánica del suelo (MOS). Los resultados mostraron que a mayor altitud, el contenido de MOS fue en general también mayor, alcanzando valores de hasta 22 % (Cuadro 10). Para la MOS estos resultados pueden ser explicados, si se considera que la altitud es un factor que influye sobre la temperatura y ésta sobre el tipo de vegetación presente en el lugar y en el metabolismo tanto de macro como de microorganismos. En el caso de los microorganismos que se sabe intervienen en la descomposición de la materia orgánica, deben influir en una lenta descomposición de MOS y así sus contenidos se incrementan y relacionan con la altitud, ya que en los sitios mas bajos del gradiente altitudinal (2600 – 2900 msnm), se encontraron valores de 2% en promedio, mientras que en los localizados a altitudes mayores a los 3200 msnm, los contenidos de MOS siempre fueron mayores a 4 y hasta 22% lo que puede ser uno de los factores que contribuyen al aumento en la acidez de estos sitios.

Cuadro 10. Principales propiedades químicas de los suelos en los sitios de estudio.

Sitio*	Propiedades Químicas									
	MOS	N-total	CO*	C/N	P	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl
	%		1 ha ⁻¹		ppm		cmol	kg ⁻¹	suelo	
W de D 14	2.43	0.04	25.39	25.33	122.22	0.00	0.18	7.15	0.24	7.49
Cuilxochitla	3.04	0.08	31.71	21.71	40.52	1.75	1.19	25.52	3.87	32.32
D 14	2.25	0.05	23.44	19.31	88.89	1.03	0.51	9.21	0.56	11.31
Pasiontítla	3.48	0.22	36.37	7.44	74.81	0.08	0.44	19.14	0.51	20.17
O 17	2.32	0.18	24.25	7.11	118.52	2.15	0.97	21.97	1.84	26.93
O 1	4.40	0.24	45.89	10.61	240.74	2.70	0.45	81.51	3.88	88.54
F 1	6.25	0.17	65.28	19.68	81.48	2.54	0.22	6.38	1.29	10.44
F 5	4.20	0.19	43.83	11.33	100.00	2.54	0.25	5.67	0.55	9.02
F 11	12.11	0.22	126.47	26.22	88.89	0.95	0.27	16.3	0.81	18.34
F 2	11.46	0.21	119.63	27.97	97.04	0.64	0.43	26.23	1.34	28.63
Coronilla	22.78	0.30	237.78	46.03	49.63	2.07	0.26	26.23	0.88	29.43
Paso de Cortés	13.14	0.25	137.21	30.33	120.37	0.48	0.31	21.26	0.90	22.96

*58% de CO:MOS, (Stevenson, 1982, citado por Himes, 1998).

MOS, materia orgánica del suelo; CO, carbono orgánico; Cl, Cationes intercambiables.

Un elemento esencial de gran importancia en la nutrición vegetal tanto de plantas cultivadas como de la vegetación natural es el N. Respecto al N-total, se encontraron valores entre 0.04 y 0.3%. Se debe señalar que los porcentajes de N-total en el suelo, presentaron la misma tendencia que se observó para la MOS (Figura 12), es decir, el N-total también se incrementó con la altitud. En estos suelos, ricos en materia orgánica, también se tuvieron contenidos aceptables de N-total en los primeros 20 cm siendo este, uno de los elementos con adecuada concentración en el suelo.

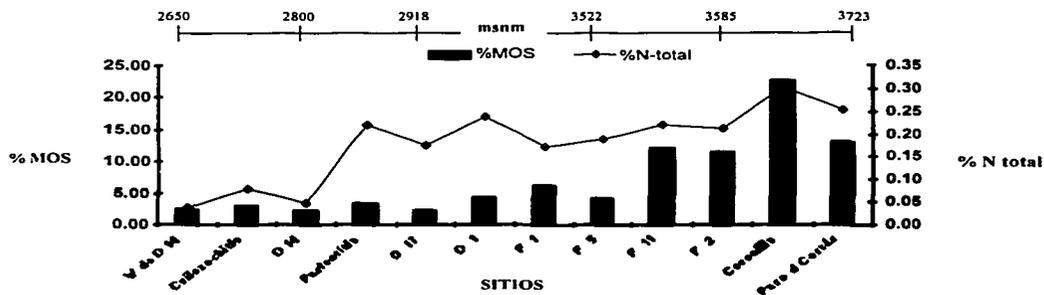


Figura 12. Relación de la altitud con el porcentaje de nitrógeno (N) y materia orgánica del suelo (MOS).

Con relación a los resultados encontrados para este nutriente, Pritchett (1991) mencionó que, el N-total en suelos forestales se puede encontrar principalmente en la capa de humus de la cubierta forestal y en el horizonte mineral A1, desde no más de 1 t ha^{-1} en suelos arenosos muy drenados, hasta 30 toneladas en bosques boreales que tienen una gran acumulación de humus. En estos suelos la acumulación del N se ve favorecida por el clima frío y una excesiva humedad del suelo durante gran parte del año.

El P disponible presentó valores desde 40 y hasta 240 mg kg^{-1} de suelo. Cabe aclarar que aunque este elemento puede calcularse a partir de valores de materia orgánica (P-total; Jenkinson, 1988 citado por Himes, 1998), los datos fueron obtenidos por el método Bray-I, son de suma importancia, pues éste es el fósforo disponible para las especies vegetales.

La suma de cationes intercambiables (CI), es una reserva importante de nutrientes que se alojan en el complejo de cambio (arcillas y humus). En esta investigación se extrajeron los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} y se sumaron para conocer las bases intercambiables (Cuadro 10). Con respecto a la suma de cationes intercambiables, los valores que se encontraron estuvieron en el intervalo de 7.49 hasta $88.54 \text{ cmol kg}^{-1}$ de suelo (sitio O1), cuyo valor se va hasta cuatro veces más del promedio y que esta relacionado con el pH, muy cercano a la neutralidad en este sitio. De los cationes determinados, el Mg^{2+} y principalmente el Ca^{2+} son los que presentaron mayores cantidades, con valores promedio de 1.38 y 16 cmol kg^{-1} de suelo, que en realidad son valores de medios a bajos. Pritchett (1991) mencionó al Ca^{2+} como catión principal en el complejo de cambio y también una elevada cantidad de Mg^{2+} los cuales son propios de suelos forestales. El Na^+ presentó concentraciones menores al Ca^{2+} y Mg^{2+} . Su valor más alto fue de 2.7 cmol kg^{-1} de suelo. El K^+ se encontró en cantidades que van de 0.18 a $1.19 \text{ cmol kg}^{-1}$ de suelo. Estas cantidades se consideran como suficientes para el buen desarrollo de las especies forestales de los sitios, además en particular este catión presenta gran relación con el porcentaje de humedad en los primeros 10 cm de el suelo.

Del AEMV realizado a los parámetros químicos, se obtuvieron a partir de doce VO, tres CP, definidos cada uno, por una variable más robusta (VR) que el resto de las VO, éstos tres CP

explican el 85% de la varianza entre todos los datos de los doce sitios de observación (Cuadro 11).

Cuadro 11. CP del grupo de los parámetros químicos

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza acumulada
		%	%
1	5.98	49.8	49.8
2	2.82	23.5	73.3
3	1.46	12.1	85.5

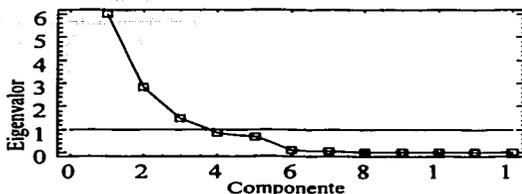


Figura 13. Dispersión de los CP (parámetros químicos)

En la Figura 13 se muestra la gráfica de dispersión de 12 CP formados a partir de las variables (parámetros o indicadores) químicos. El mayor % de varianza entre los datos se encuentra en los primeros 3 CP que a su vez tienen eigenvalores mayores a 1. Los CP fueron definidos de la siguiente manera; el CP uno, por el CO (0.404), el CP dos, por Ca⁺ (0.5454) y el CP tres, por el K⁺ (0.5826). Estas variables y el ya referido carácter ácido del suelo, están relacionadas de manera estrecha con la fertilidad, la disponibilidad de nutrimentos y proporcionan información sobre las condiciones nutrimentales del suelo en las que se desarrollan la vegetación y las comunidades microbianas.

La fórmula algebraica para determinar a cada uno de los componentes es la siguiente:

$$C1 = 0.40403 \%MOS + 0.404047 \%C.O. + 0.288499 \%N + 0.323353 \%C/N + 0.404112 \%S + 0.404125 \%P + 0.308816 \%N-t + 0.0939891 \%Pasimilable - 0.014758 \%Na - 0.200372 \%K + 0.0114082 \%Ca - 0.119981 \%Mg$$

$$C2 = 0.008776 \%MOS + 0.008677 \%C.O. + 0.246782 \%N - 0.173511 \%C/N + 0.0099 \%S + 0.00852 \%P + 0.29756 \%N-t + 0.40252 \%P + 0.3606 \%Na + 0.14857 \%K + 0.545441 \%Ca + 0.456608 \%Mg$$

$$C3 = 0.112752 \%MOS + 0.112587 \%C.O. - 0.290889 \%N + 0.290889 \%C/N + 0.11164 \%S + 0.11163 \%P - 0.19657 \%N-t - 0.42679 \%P + 0.19798 \%Na + 0.582637 \%K - 0.006494 \%Ca + 0.425232 \%Mg$$

Nota: Cada vector calculado por el ACP, debe multiplicarse por el valor de cada VO, sin embargo debe tomarse en cuenta que las VO fueron estandarizadas, por lo tanto al sustituirse en la ecuación para cada CP, primero se le debe restar la media aritmética y dividirse entre la desviación estándar (Anexo 4B).

En el Cuadro 12, se muestra el índice químico de calidad para cada uno de los sitios de observación el cual, como para el ICS_(físico), se obtuvo al desarrollar las ecuaciones de los CP y se integraron en una sumatoria, (ICS_(químico) = CP1_{MOS} + CP2_{Ca⁺} + CP3_{K⁺}). Donde ICS_(químico) es el índice de calidad de suelo determinado a partir de los parámetros químicos de los suelos.

Cuadro 12. Índice químico de calidad de suelo

Sitio	Índice químico de calidad
Coronilla	6.9300093
O 1	2.56682
Paso de Cortés	1.681276
F 2	1.5436211
F 11	1.15231
Cuixlochochitla	0.952121
F 1	-0.715227
O 17	-0.715331
F 5	-1.998706
Pasiontitla	-2.695611
D 14	-3.731895
W de D 14	-4.969366

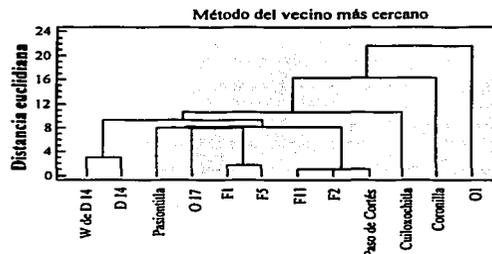


Figura 14. Dendrograma de similitud entre sitios, con base en los parámetros químicos.

Con los resultados obtenidos para el índice $ICS_{(químico)}$ se encontró que, aunque el sitio con mejor calidad fue Coronilla, O1 ocupó el segundo lugar de calidad para este índice debido a que presentó los valores más altos en la suma de cationes intercambiables y en P y fue el de mayor valor para $ICS_{(físico)}$, en amplia correspondencia con el $ICS_{(químico)}$ encontrado. Coronilla pudo ocupar el primer lugar por su alto contenido en MOS que a su vez se relaciona con el % de N-total.

Por otro lado, el sitio con la menor calidad fue W de D 14 lugar que presentó de los valores más bajos en % de MOS y de N-total y K^+ , Mg^+ y Cl^- (0.18, 0.24 0.7 $cmol\ kg^{-1}$ de suelo respectivamente), lo que le proporciona una fertilidad menor.

Los resultados descritos, coinciden con los reportados por Castillo (2002) en su estudio sobre indicadores de calidad, ella encontró que de entre los parámetros que explicaron la mayor variabilidad entre sitios estuvo el Ca^+ , K^+ , Mg^+ y Na^+ del suelo, parámetros, que son lo suficientemente sensibles para emplearse como indicadores de calidad del suelo. En caso análogo también con los resultados de esta investigación, Bautista (2001) interpretó a uno de los CP, como "estado nutrimental relacionado con materia orgánica", dando a ésta propiedad una gran importancia en su estudio de calidad.

En el ACT para el grupo de parámetros químicos se encontró a O1 entre los de mejor calidad en amplia correspondencia con el $ICS_{(químico)}$ y el $ICS_{(físico)}$. El segundo lugar fue Coronilla, que respecto a $ICS_{(físico)}$, ocupó el último lugar en calidad. Como ya se indicó el alto %

de MOS y N-total, en este sitio, pudo influir para su ascenso en calidad respecto a este grupo de parámetros.

En la Figura 14, se observa que la agrupación por similitud entre sitios de observación, permitió distinguir a O 1 (2º lugar de calidad, según el ACP) el cual se agrupa a los demás sitios hasta el 7º ciclo de agrupación. Caso opuesto es el sitio W de D14, que se agrupó al inicio, de igual manera que en el dendrograma obtenido a partir de los parámetros físicos.

6.4 Indicadores biológicos de calidad del suelo

Los microorganismos del suelo son de los indicadores de calidad edáfica más sensibles y pueden potencialmente, ser indicadores de suelos perturbados o contaminados. Debido a que el suelo es un cuerpo natural de alta heterogeneidad, con variaciones espaciales en profundidad, humedad, temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes, condiciones de salinidad, entre otras, mismas que propician una alta diversidad de microambientes, que a su vez son afectados por la presencia de factores, como de O₂ y CO₂, lo que influye sobre el número, distribución y tipo de poblaciones microbianas. La actividad de los microorganismos está afectada por las mismas condiciones ambientales del suelo y por los factores ambientales que operan sobre el desarrollo de las plantas.

En el Cuadro 13, se presentan los resultados cualitativos de las poblaciones microbianas encontradas en los sitios de estudio que corresponden al declive occidental del PN Iztaccihuatl-Popocatepetl.

Cuadro 13. Estimación cualitativa de poblaciones microbianas de los suelos.

Sitio	Propiedades Biológicas			
	Bacterias*	Hongos*	Actinomicetos*	Algas*
W de D 14	2	1	2	1
Cuixlochitla	3	3	1	1
D 14	2	2	1	1
Pasiontitla	2	2	1	0
O 17	2	2	1	0
O 1	3	3	3	1
F 1	3	3	2	0
F 5	2	2	1	1
F 11	2	1	2	0
F 2	2	1	1	0
Coronilla	2	2	1	1
Paso de Cortés	3	2	1	0

*Escala utilizada para determinar la distribución microbiana: 0; ausentes; 1; presencia; 2; Abundantes y 3; Muy abundante.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados mostraron alta homogeneidad en presencia de poblaciones microbianas a lo largo del gradiente, también pocas diferencias en cuanto a la abundancia lo que puede atribuirse a que la técnica utilizada es cualitativa y no permite estimar diferencias significativas entre sitios. Sin embargo de acuerdo a la escala utilizada, O1 presentó los valores máximos en cuanto a abundancia de colonias microbianas (Cuadro 13), con excepción de la presencia de algas del suelo, muy probablemente por las características propias de estos organismos, que requieren alto contenido de humedad, el cual en ese sitio no fue el suficiente para que éstas se desarrollen en mayor grado (Figura 15).



Figura 15. Placas teñidas de acuerdo a la técnica de Rossi- Cholodny y del lado derecho una microfotografía 100X de una colonia bacteriana.

Es conocido el efecto del pH, la C.E. (Figura 16), así como el contenido de fósforo y los Cl, sobre el desarrollo de estas poblaciones.

Como lo señala la USDA (1998), las poblaciones microbianas son muy sensibles a los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo.

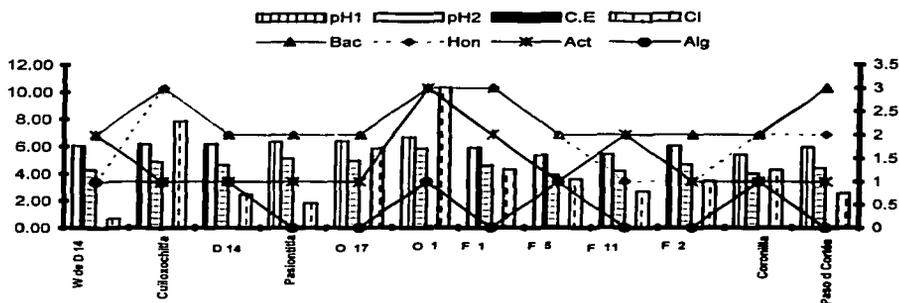


Figura 16. Efecto de los cambios de los parámetros físicos y químicos en el desarrollo de las poblaciones microbianas.

Con la base del conocimiento de las limitaciones de este método y las generalidades de esta técnica se observó la importancia de incorporar un índice del componente microbiano al estudio de la calidad del suelo.

Con el AEMV de los parámetros biológicos, se obtuvieron dos CP, a partir de cuatro VO el CP uno tiene como VR al grupo de las bacterias (0.6401) y el CP dos a las algas (0.9452), estos CP explican el 74% de la varianza entre todos los datos de los doce sitios de observación (Cuadro 14).

Cuadro 14. CP del grupo de los parámetros biológicos

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza acumulada
		%	%
1	1.96023	49.0	49
2	1.00103	25.0	74

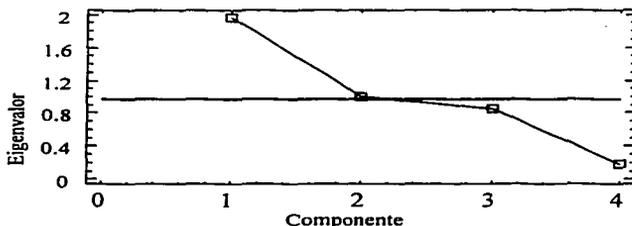


Figura 17. Dispersión de los CP (parámetros biológicos)

En la Figura 17 se muestra la gráfica de dispersión de 4 CP formados a partir de las variables (parámetros o indicadores) biológicos. El mayor % de varianza entre los datos se encuentra en los primeros 2 CP (eigenvalores mayores a 1). Las dos comunidades de microorganismos que definen a los CP son los casos extremos dentro de los grupos estudiados, pues mientras las colonias bacterianas se encontraron en el 100% de las placas y de manera abundante, las algas solo se presentaron en el 50% de ellas. Esto explica por lo que el ACP las defina como VR para la calidad del suelo.

La fórmula algebraica para determinar a cada uno de los componentes es la siguiente:

$$CP1 = 0.640175 * \text{bacterias} + 0.626339 * \text{hongos} + 0.393671 * \text{Actinomicetes} + 0.207118 * \text{Algas}$$

$$CP2 = -0.31545 * \text{bacterias} - 0.03709 * \text{hongos} + 0.07465 * \text{Actinomicetes} + 0.94527 * \text{Algas}$$

Nota: Cada vector calculado por el ACP, debe multiplicarse por el valor de cada VO, sin embargo debe tomarse en cuenta que las VO fueron estandarizados, por lo tanto al sustituirse en la ecuación para cada CP, primero se le debe restar la media aritmética y dividirse entre la desviación estándar (Anexo 4C).

El Cuadro 15, muestra el índices biológico de calidad para cada uno de los sitios de observación, el cual se desarrolló de manera análoga a los anteriores índices. Solo que este se construyó a partir de los parámetros biológicos de estos suelos. $ICS_{(\text{biológico})} = CP1_{\text{bacterias}} + CP2_{\text{algas}}$.

Cuadro 15. Índice biológico de calidad

Sitio	Índice biológico de calidad
O 1	3.449992
Cuiloxochitla	2.048979
D 14	0.591612
F 5	0.591612
Coronilla	0.591612
F 1	0.54283
W de D 14	0.49427
Paso de Cortés	-0.955527
Pasiontita	-1.615049
O 17	-1.615049
F 11	-1.712387
F 2	-2.412899

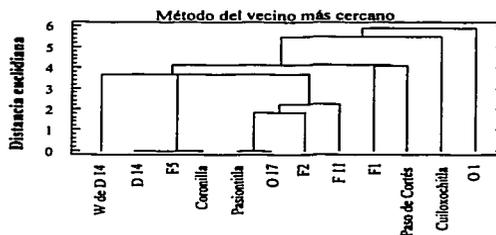


Figura 18. Dendrograma de similitud entre sitios, con base en los parámetros químicos.

Como se mostró en el Cuadro 15, el sitio con mejor calidad es nuevamente O1, el cual presentó la mayor abundancia de colonias microbianas, lo que habla de condiciones edáficas favorables para el desarrollo y actividad microbiana de las mismas, así como de la influencia que tienen a su vez éstas comunidades en la estructura y la incorporación cíclica de los nutrimentos al suelo. Lo que ya se corroboró a lo largo del análisis de cada grupo de parámetros.

El sitio con menor calidad es F2, en este caso no deben olvidarse las limitaciones que presenta la técnica cualitativa empleada, lo que podría afectar tanto en la evaluación de la calidad de suelo, tomando en cuenta solo este índice, así como en la separación de los sitios en el dendrograma (Figura 18).

A pesar de que la correspondencia entre el ACP y el AC, para este índice no fue tan contundente, el dendrograma nos reitera que, O1 sigue agrupándose al final y es este el sitio con mejor calidad dentro del grupo de acuerdo con el ICS_(biológico).

6.5 Indicadores bioquímicos de calidad del suelo

El Cuadro 16, presenta los resultados de la evolución de CO₂ la cual se encontró en un intervalo con valores que oscilan en general entre 6 y 8 kg de CO₂ ha⁻¹día⁻¹ a lo largo del gradiente altitudinal. El contenido de carbono orgánico (CO) del suelo que si se relacionó en forma proporcional con respecto a la altitud, es un factor que influye en la respiración del suelo o evolución de CO₂, sin embargo ésta, también depende de otros factores del suelo como pH, nutrimentos, humedad, temperatura, etc, por lo que no se observó una tendencia general de la evolución de CO₂ respecto a la altitud.

Con los resultados de evolución de CO₂, se encontró que este gas, producto de la respiración y actividad microbiana tuvo valores desde 3.83 y hasta 15.84 kg ha⁻¹ día⁻¹ (Cuadro 16), este último valor coincide con el sitio O1 en el cual se tuvo la mayor población microbiana, lo que indica el efecto de estas poblaciones en los procesos dinámicos del suelo, así como la importancia de interrelacionar técnicas para hacer una mejor evaluación de la calidad del suelo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuadro 16. Propiedades bioquímicas de los suelos en los sitios de estudio.

Sitio	Parámetros Bioquímicos ⁽¹⁾				CO ⁽²⁾ t ha ⁻¹
	CO ₂ kg ha ⁻¹ día ⁻¹	CBM kg ha ⁻¹	Fosfatasa _(pH5) µg p-NP g ⁻¹ h ⁻¹	Fosfatasa _(pH11) µg p-NP g ⁻¹ h ⁻¹	
W de D 14	3.83	322.66	0.032	0.016	25.39
Cuixlochochitla	8.02	247.67	0.035	0.018	31.71
D 14	6.57	206.53	0.026	0.014	23.44
Pasióntitla	7.27	128.73	0.027	0.017	36.37
O 17	6.34	258.22	0.025	0.016	24.25
O 1	15.84	27.28	0.027	0.013	45.89
F 1	6.28	118.98	0.027	0.012	65.28
F 5	3.77	165.59	0.029	0.014	43.83
F 11	8.65	297.41	0.032	0.015	126.47
F 2	6.55	140.72	0.032	0.016	119.63
Coronilla	6.76	235.81	0.051	0.015	237.78
Paso de Cortés	7.55	117.06	0.039	0.013	137.21

(1)muestra de 0-10 cm, (2)muestra de 0-20 cm
CBM, Carbono en la biomasa microbiana; CO, Carbono orgánico.

La altitud tiene influencia sobre las comunidades microbianas y de acuerdo con lo reportado por Harris (1992), los contenidos de humedad y variaciones de temperatura que acompañan los cambios de altitud, son los factores que tienen mayor efecto en la actividad de las poblaciones microbianas.

Se encontró que el pH, la conductividad eléctrica y el espacio poroso, si tuvieron efecto sobre las poblaciones microbianas y su actividad metabólica, por otro lado el contenido de humedad presente en cada sitio propició una película de agua y suministro de oxígeno adecuado para el desarrollo y nutrición de los microorganismos del suelo y esto se observó en los contenidos de P, Na, Ca y Mg presentes en los sitios de observación. En estrecha relación con lo encontrado por Núñez (1998), se observó que a los sitios con mayor cantidad y humedad de mantillo les corresponden incrementos en la actividad microbiana.

Para calcular el carbono en la biomasa microbiana (CBM), se determinó la cantidad de CO₂ en el suelo después de ser fumigado y reinoculado, y se observaron diferencias de hasta un 300% con respecto a la parte natural (no fumigada), lo que se puede explicar bajo dos premisas; la respiración microbiana (medida a partir de la producción de CO₂) se eleva de manera significativa al incrementar la humedad del suelo y posteriormente desecarlo. Los trabajos de Jenkinson (1966, citado por Horwath y Paul, 1994) y Harris (1992), coinciden en este sentido y plantean que los remanentes de la población microbiana junto con la reinoculada producen

oleadas de CO₂ después de este proceso. Estas diferencias en la respiración microbiana también se explican si se toma en cuenta que la población que está bajo condiciones de campo naturales debe mantener su estado metabólico aproximadamente constante, mientras que en el suelo fumigado y reinoculado debe acelerar su metabolismo para alcanzar de nueva cuenta su condición de equilibrio. De esta manera se explica la relación inversa que existe entre la producción de CO₂ y la cantidad de CBM que tienen estos suelos bajo las condiciones de cada sitio.

Con respecto a la actividad de las enzimas fosfatasa ácida y alcalina, en resultados similares a los reportados por Herbie y Neal (1990) y Tabatabai (1994), se encontró que la actividad de la fosfatasa ácida es casi un 100% mayor que la fosfatasa alcalina debido principalmente a la naturaleza ácida de estos suelos. Aunque pequeñas, las diferencias de la actividad fosfatásica entre los sitios, representan significancia debido a que las unidades en las que se expresa la actividad son $\mu\text{g p-NP g}^{-1}$ de suelo h^{-1} las cuales, referidas a las toneladas de suelo por hectárea (1800 t en promedio), llega a ser muy importante para la movilización del P orgánico que es una reserva de gran importancia para las plantas de acuerdo con Cruz-Flores (2003). Se observó que en un intervalo de altitud de los 2800 a los 3500 msnm la actividad fosfatásica ácida es ligeramente menor debido, probablemente, al efecto de la MOS en este intervalo altitudinal y de manera indiscutible al pH activo. Los contenidos de P extractable y la actividad de la fosfatasa ácida como lo marca Marschner (1995), presentan una correspondencia inversa.

Del análisis multivariado realizado a los parámetros bioquímicos, se obtuvieron a partir de cuatro VO, dos CP, definidos por las VR, CBM (-0.6434) y actividad fosfatásica ácida (0.96) respectivamente, estos CP, explican el 72.114% de la varianza entre todos los datos de los doce sitios de observación (Cuadro 17), presentan eigenvalores mayores a 1 (Figura 19). Lo que resulta muy conveniente en la depuración de variables, puesto que de las cuatro VO son éstas las más convenientes, ya sea por la información que de ellas se extrae, como es la actividad microbiana o por la congruencia con las características ácidas que presentan estos suelos, como es el caso de la actividad fosfatásica.

Cuadro 17. CP del grupo de los parámetros bioquímicos

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza acumulada
1	1.93	48.2	48.2
2	0.96	23.8	72.1

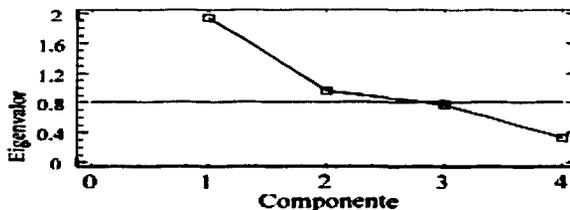


Figura 19. Dispersión de los CP (parámetros bioquímicos)

La fórmula algebraica para determinar a cada uno de los componentes es la siguiente:

$$CP1 = 0.518805 \cdot CO_2 - 0.64343 \cdot CBM - 0.243461 \cdot \text{Actividad fosfatásica ácida} - 0.50751 \cdot \text{Actividad fosfatásica alcalina}$$

$$CP2 = 0.174262 \cdot CO_2 - 0.038577 \cdot CBM + 0.960607 \cdot \text{Actividad fosfatásica ácida} - 0.2084 \cdot \text{Actividad fosfatásica alcalina}$$

Nota: Cada vector calculado por el ACP, debe multiplicarse por el valor de cada VO, sin embargo debe tomarse en cuenta que los VO fueron estandarizados, por lo tanto al sustituirse en la ecuación para cada CP, primero se le debe restar la media aritmética y dividirse entre la desviación estándar (Anexo 4D).

En el Cuadro 18 se encuentra el índice de calidad de suelo estimado con base en los parámetros bioquímicos. Este índice se calculó al desarrollar la ecuación de cada CP, con la posterior sumatoria de estos. Quedando, $ICS_{(bioquímico)} = CP1_{CBM} + CP2_{\text{actividad fosfatásica ácida}}$

Cuadro 18. Índice bioquímicos de calidad de suelo

Sitio	Índice bioquímico de calidad
O 1	3.53701
Paso de Cortés	2.113292
Coronilla	1.34908
F 1	1.034837
F 2	-0.196417
D 14	-0.508473
F 5	-0.5170589
F 11	-0.5849803
Pasiontitla	-0.8290557
Cuiloxochitla	-1.236942
O 17	-1.879812
W de D 14	-2.28148

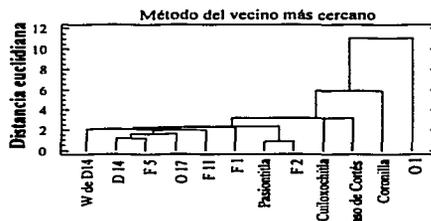


Figura 20. Dendrograma de similitud entre sitios con base en los parámetros bioquímicos.

Con base en este índice se observó que O1 presentó características que lo hacen diferente y se confirmó que este es el sitio con mejor calidad edáfica, ya que en los diferentes AEMV, mostró las mejores cualidades edáficas, como son el pH_{activo}, CE, P, CI, CO₂ y distribución espacial y abundancia de las poblaciones microbianas. Lo que se observó en los dendrogramas ya mostrados y el que corresponde a los parámetros bioquímicos, no es la excepción (Figura 20).

Los parámetros CO₂ y CBM resultaron ser muy sensibles a los cambios en la calidad del suelo y por lo tanto se deben utilizar como indicadores de calidad. Lo que coincide con lo reportado con Avilés (2002, citado por Castillo 2002) y Bautista (2001).

6.6 Estimación de la reserva nutrimental por aporte del mantillo

Al realizar el análisis químico de los nutrimentos en reserva en mantillo, se encontró que en este sustrato, el porcentaje de N presentó un comportamiento con respecto a la altitud, similar a las encontradas en el suelo (Cuadro 19) aunque las diferencias numéricas no son tan marcadas como en este.

Cuadro 19. Reserva nutrimental en el mantillo de los sitios de observación.

Lugar	Concentración y contenido de nutrimentos en mantillo																
	N						P						N/P	Na	K	Ca	Mg
	N	P	Na	K	Ca	Mg	N	P	N/P	Na	K	Ca	Mg				
	%						t h ⁻¹										
W de D14	0.97	0.04	0.68	0.10	3.13	0.15	155.46	5.94	26.17	109.74	15.22	500.75	24.47				
Cuixlochochitla	0.88	0.04	0.51	0.09	3.35	0.25	36.59	1.63	22.45	20.96	3.86	139.05	10.17				
D14	0.98	0.05	0.62	0.15	4.74	0.23	84.99	4.35	19.54	53.49	12.86	410.29	20.20				
Pasiontitla	0.93	0.04	0.49	0.07	4.26	0.20	117.18	5.19	22.58	62.12	8.55	535.57	24.83				
O17	1.01	0.04	0.33	0.10	6.51	0.25	32.70	1.20	27.25	10.68	3.22	209.74	8.06				
F1	1.20	0.04	0.49	0.09	3.07	0.27	198.61	6.06	32.77	82.01	14.63	509.07	44.50				
F5	1.03	0.03	0.32	0.09	1.99	0.11	56.81	1.73	32.84	17.40	4.68	108.02	6.11				
F11	0.98	0.05	0.54	0.09	5.31	0.21	58.81	2.88	20.42	32.55	5.47	317.90	12.57				
F2	1.01	0.04	0.52	0.10	4.89	0.27	126.12	5.17	24.39	65.30	12.29	611.38	33.19				
Coronilla	1.23	0.03	0.46	0.09	1.73	0.13	72.85	2.03	35.89	27.37	5.18	102.24	7.52				
Paso de Cortés	1.07	0.05	0.62	0.12	4.49	0.21	151.91	6.76	22.47	88.13	17.52	636.67	29.64				
Máximo	1.23	0.05	0.68	0.15	6.51	0.27	198.61	6.76	29.38	109.74	17.52	636.67	44.50				
Mínimo	0.88	0.03	0.32	0.07	1.73	0.11	32.70	1.20	27.25	10.68	3.22	102.24	6.11				
Promedio	1.03	0.04	0.51	0.10	3.95	0.21	99.21	3.90	25.44	51.80	9.41	370.97	20.11				

El P como elemento que con frecuencia limita el desarrollo de la vegetación, tiene a lo largo del gradiente un promedio de 0.04%, valores muy bajos si se comparan con los de N, lo que da como resultado relaciones N/P desde 20:1 hasta 32:1 en altitudes alrededor de los 3225 msnm

y 35:1 en el sitio denominado La Coronilla (3600 msnm). Se observó así, que en estos sitios el factor limitante puede ser el P.

Aunque el Na no es un nutrimento esencial se debe destacar los altos porcentajes que se observaron en mantillo, solo rebasados por los de N y Ca lo que habla de la poca movilidad del Na o de la poca necesidad que tienen estas especies para recuperarlo antes de la abscisión foliar.

El K y el Mg presentaron una concentración semejante 0.1 y 0.2% respectivamente, dentro del gradiente altitudinal, tendencia que también presenta el Ca elemento con porcentajes de hasta 6.5%. Los contenidos de N y P y su relación señala que el P puede ser limitante del crecimiento de las plantas.

6.7 Estado nutrimental del género *Pinus*

En el PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl, se encontraron diferentes especies del género *Pinus* los cuales dominan en los sitios de observación. Entre ellos se presentaron diferencias en los contenidos nutrimentales en estas especies (Cuadro 20).

Para el N, el porcentaje encontrado se presentó entre 0.893 y 1.727 % con una media de 1.418 % para los pinos de esta zona. Con excepción de los sitios D 14 y Cuiloxochitla, cuyos porcentajes de N se encontraron en el nivel de deficiencia de acuerdo con Zotl (1973, citado por Touzet, 1987), en los demás sitios, la concentración de N, mostró un nivel de concentración para suficiencia y crecimiento óptimo. En plantas cultivadas (estrategia de adaptación tipo II), el % de N oscila entre 1 y 5% y con valores menores a 2% se presentan valores de deficiencia, lo cual no ocurre en plantas del género *Pinus* que tienen otros requerimientos nutrimentales por ser de estrategia de adaptación tipo I.

En el caso del P, se encontró en niveles que van de 0.042 a 0.098 %, sólo dos sitios O17 y O1 en la especie *P. montezumae*, presentan niveles de suficiencia, 4 muestras colectadas deficiencia extrema y en las 10 restantes deficiencia.

Para el caso de *P. montezumae*, esta especie presenta un %N y de P aproximadamente constante a lo largo del gradiente altitudinal por lo que con estos resultados se puede deducir que en esta especie la altitud no es un factor que determine alguna influencia sobre el estado nutrimental.

Cuadro 20. Contenido nutrimental en tejido foliar de pino en el declive occidental del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl.**

Lugar	Especie*	N	Contenido nutrimental en tejido foliar				
			P	Na	K	Ca	Mg
		%					
W de D14	<i>P. montezumae</i>	1.404 _s	0.058 _{DE}	0.666	1.212 _{CO}	2.131 _{CO}	0.195 _{CO}
D14	<i>P. montezumae</i>	0.893 _D	0.074 _D	0.632	1.266 _{CO}	1.023 _{CO}	0.105 _{CO}
O17	<i>P. montezumae</i>	1.573 _{CO}	0.098 _s	0.086	1.216 _{CO}	0.440 _{CO}	0.103 _{CO}
O1	<i>P. montezumae</i>	1.471 _s	0.095 _s	0.439	1.164 _{CO}	1.563 _{CO}	0.139 _{CO}
Cuixlochochitla	<i>P. teocote</i>	0.983 _D	0.045 _{DE}	0.077	1.076 _{CO}	0.199 _{CO}	0.109 _{CO}
Pasiontitla	<i>P. teocote</i>	1.214 _s	0.069 _D	0.585	0.937 _{CO}	0.938 _{CO}	0.118 _{CO}
Pasiontitla	<i>P. patula</i>	1.727 _{CO}	0.058 _D	0.574	1.046 _{CO}	1.506 _{CO}	0.135 _{CO}
Pasiontitla	<i>P. pseudostrubus</i>	1.625 _{CO}	0.042 _{DE}	0.638	1.086 _{CO}	0.313 _{CO}	0.090 _D
O17	<i>P. pseudostrubus</i>	1.484 _s	0.090 _D	0.445	1.279 _{CO}	0.170 _{CO}	0.081 _D
F1	<i>P. pseudostrubus</i>	1.342 _s	0.061 _D	0.425	1.182 _{CO}	0.426 _{CO}	0.088 _D
F1	<i>P. hartwegii</i>	1.394 _s	0.066 _D	0.425	1.019 _{CO}	0.256 _{CO}	0.086 _D
F5	<i>P. hartwegii</i>	1.727 _{CO}	0.074 _D	0.434	1.176 _{CO}	0.483 _{CO}	0.084 _D
F11	<i>P. hartwegii</i>	1.432 _s	0.069 _D	0.246	1.143 _{CO}	0.341 _{CO}	0.089 _D
F2	<i>P. hartwegii</i>	1.586 _{CO}	0.066 _D	0.185	1.272 _{CO}	4.688 _{CO}	0.097 _{CO}
Coronilla	<i>P. hartwegii</i>	1.278 _s	0.085 _D	0.116	1.138 _{CO}	0.369 _{CO}	0.092 _D
Paso de Cortés	<i>P. hartwegii</i>	1.561 _{CO}	0.077 _D	0.585	1.076 _{CO}	0.284 _{CO}	0.092 _D
	Máximo	1.727	0.098	0.666	1.279	4.688	0.195
<i>Pinus sp.</i>	Mínimo	0.893	0.042	0.077	0.937	0.170	0.081
	Promedio	1.418	0.070	0.410	1.143	0.945	0.107

* Los datos están ordenados por especies de acuerdo a su localización dentro del gradiente altitudinal.

** Intervalos de suficiencia propuesto por Touzet, 1987. CO crecimiento óptimo; DE deficiencia extrema; D deficiencia; S, suficiente, de la modificación del Cuadro 5.

En la especie *P. pseudostrubus* los porcentajes de N y de P presentaron relación con la altitud ya que con el aumento de esta, los porcentajes de los nutrimentos N y P, también se elevan. Esta misma tendencia la presentó *P. hartwegii*, con la particularidad de que los mayores %N, fueron encontrados en esta especie, con un máximo en los 3550 msnm lo que podría atribuirse a que estas son las condiciones idóneas para esta especie, sin dejar de considerar el efecto de la temperatura en el metabolismo de los individuos y también del pH del suelo y su influencia en la disponibilidad de los nutrimentos. Para el caso de *P. teocote*, un aumento en el %N y de P también se relacionó con la altitud (Cuadro 20).

De manera general el %N foliar presente en las diferentes especies se correlacionó con los % MOS y de N en el suelo, además de que se presentó una relación directa con el incremento en la altitud. El %N en suelo, así como su disponibilidad se vieron afectados por el pH pues se observó que aunque en general son ácidos, los mayores porcentajes de N están relacionados con

valores de pH de alrededor de seis unidades, en donde la acidez es más ligera y la disponibilidad del N fue mayor.

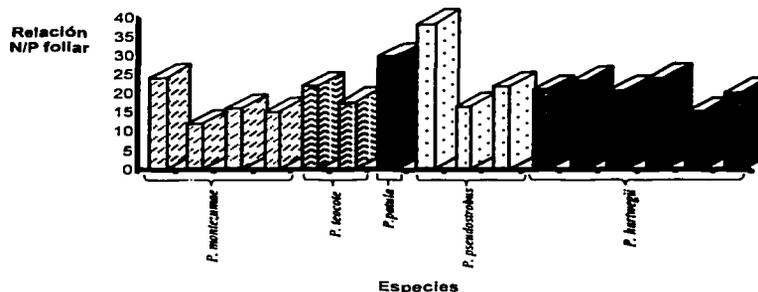


Figura 21. Relación N/P en los pinos del PN Iztacihuatl-Popocatepetl. Especies ordenadas de acuerdo a su localización dentro del gradiente altitudinal.

La relación N/P encontrada en *Pinus sp.* va de 15:1 a 20:1 aproximadamente (Figura 21). Las altas relaciones N/P indican deficiencia de P, así se tiene otro elemento para aseverar que el P limita el desarrollo de especies forestales en los sitios estudiados.

Los porcentajes de N en tejido foliar se encontraron en promedio de 1.4%, lo que habla de una concentración suficiente, sin descartar, además, la posibilidad de que el género *Pinus* presente una alta eficiencia interna para este elemento.

Para el caso del Na se observó que este elemento no necesita ser conservado por las especies forestales, quizá por no ser esencial, ya que la concentración en tejido foliar es muy parecida a la que se presenta en el mantillo y no se observaron diferencias claras entre especies a lo largo del gradiente. Esta tendencia la mostraron el resto de los cationes determinados en el tejido foliar con excepción del Mg, donde a partir de los 2900 msnm, disminuyó ligeramente su concentración.

La variación de las muestras foliares, en concentración de nutrimentos, entre los sitios es mayor en P, Ca y N. Debido probablemente a diferencias intragenéricas, condiciones de cada sitio y la etapa fenológica de los individuos dominantes de cada sitio.

6.8 Calidad del suelo

Con los datos estandarizados de los cuatro grupos de parámetros edáficos (físicos, químicos, bioquímicos y biológicos) y la integración de los índices parciales; $ICS_{\text{físico}}$, $ICS_{\text{químico}}$, $ICS_{\text{biológico}}$, $ICS_{\text{bioquímico}}$, se determinó la calidad del suelo.

En el Cuadro 21, se muestran el número de componentes y los indicadores del suelo que definieron a cada índice parcial.

Cuadro 21. Resumen del ACP, para cada grupo de parámetros estandarizados.*

Grupo de parámetros	Variables originales	Componentes	Análisis de componentes principales	
			Varianza	Variable robusta por componente
			%	
Físico	10	3	79.181	$C_1 = \% \text{humead} (0.4286)$ $C_2 = \text{pH}_{\text{activo}} (0.5399)$ $C_3 = \% \text{arena} (-0.5188)$
Químico	12	3	85.578	$C_1 = \text{MOS} (0.40403)$ $C_2 = \text{Ca} (0.5454)$ $C_3 = \text{K} (0.5826)$
Bioquímico	4	2	72.114	$C_1 = \text{CBM} (-0.6434)$ $C_2 = \text{actividad fosfatásica ácida} (0.96)$
Biológico	4	2	74.032	$C_1 = \text{Bacterias} (0.6401)$ $C_2 = \text{Algas} (0.945273)$

* Obtenidos mediante la resta de la media de cada grupo de parámetros, entre su desviación estandar.

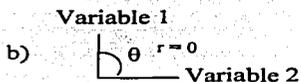
Con la intención de encontrar la mejor relación entre los índices parciales y calidad del suelo, se exploró la posibilidad de generar un índice de calidad. Para ello, si se considera a cada (índice parcial) parámetro de cada (grupo de) variable como un vector de resultados, se tiene que, dadas dos variables (índices parciales) en las que su correlación sea diferente de cero (correlacionables):

a)  Variable 1
 $F \quad r \neq 0$
Variable 2

entonces; su efecto es multiplicativo por que existe entre ellas una interacción o una variación conjunta (caso de las variables originales).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sin embargo, si la correlación es cero (no correlacionables):



entonces; la variación conjunta, también es cero y su efecto conjunto es aditivo (caso de las variables estandarizadas).

Con base en lo anterior, se propuso la definición de un índice de calidad del suelo, mediante efectos aditivos.

Al considerar que el ACP permite una reducción de variables y que estos pueden graficarse en un espacio de dos dimensiones, se confirma el supuesto de que el efecto aditivo es el más viable para proponer un índice general de calidad del suelo. Además en la Figura 22, se representa la tendencia de la calidad de suelo (por efecto aditivo y multiplicativo), por sitio con referencia al comportamiento de la materia orgánica. El efecto aditivo mostró una mejor relación con la variable citada.

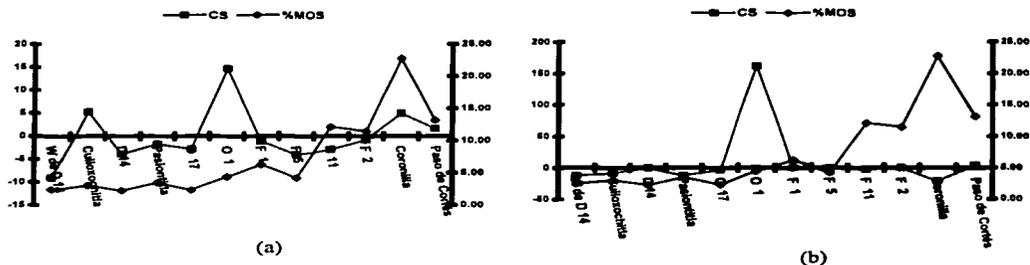


Figura 22. Correspondencia de la calidad del suelo respecto a la MOS: a) Efecto aditivo; b) Efecto multiplicativo.

Para efectuar la integración de los índices parciales y evaluar la calidad del suelo de cada sitio de observación, se relacionó también la evolución de CO_2 y el % de N, de cada sitio con la sumatoria de los índices parciales, encontrados (Figura 23), lo que dio más elementos para ratificar la propuesta de determinar la calidad del suelo mediante el proceso aditivo de los índices parciales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

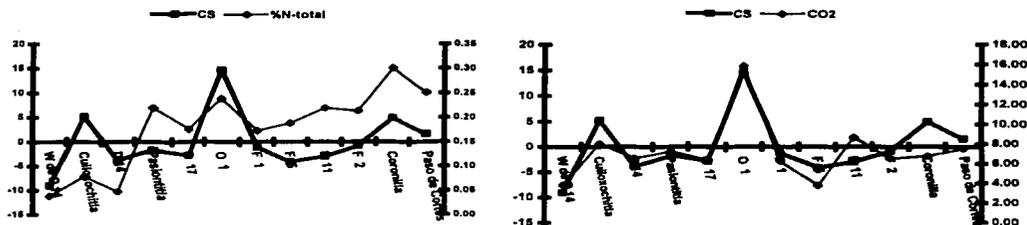


Figura 23. Correspondencia de la calidad del suelo con el % de N y la respiración microbiana.

Así se obtuvo como resultado de la integración de estos por adición [$CS = ICS_{(físico)} + ICS_{(químico)} + ICS_{(biológico)} + ICS_{(bioquímico)}$], la calidad del suelo (CS) para cada uno de los sitios de observación. En el Cuadro 22 se muestran los valores de calidad del suelo.

Cuadro 22. Índices de calidad de suelo para cada sitio de observación.

Sitio*	Índices parciales de calidad de suelo				Calidad de suelo CS
	Físico	Químico	Bioquímico	Biológico	
O 1	5.1476	2.56682	3.53701	3.449992	14.701422
Cuixlochochitla	3.46499	0.952121	-1.236942	2.048979	5.229148
Coronilla	-3.949314	6.9300093	1.34908	0.591612	4.9213873
Paso de Cortés	-1.2198346	1.681276	2.113292	-0.955527	1.6192064
F 2	0.246579	1.5436211	-0.196417	-2.412899	-0.8191159
F 1	-2.030181	-0.715227	1.034837	0.54283	-1.167741
Pasiontitla	3.441635	-2.695611	-0.8290557	-1.615049	-1.6980807
O 17	1.42458	-0.715331	-1.879812	-1.615049	-2.785612
F 11	-1.839205	1.15231	-0.5849803	-1.712387	-2.9842623
D 14	-0.210751	-3.731895	-0.508473	0.591612	-3.859507
F 5	-2.174308	-1.998706	-0.5170589	0.591612	-4.0984609
W de D 14	-2.3017941	-4.969366	-2.28148	0.49427	-9.0583701

*Sitios ordenados de manera decreciente respecto a su calidad edáfica.

Si se asume que en cada índice parcial los signos negativos implican un efecto sobre la reducción de la calidad y por el contrario, los positivos representan su contribución para aumentarla, se encontró que el sitio con mayor calidad de suelo fue O1, el cual presentó esta cualidad a lo largo del análisis de cada grupo de variables y que además está relacionado con las características que presentó en el mantillo y las muestras foliares tomadas en este sitio y como se

observa en el Cuadro 20 que muestra el contenido nutrimental, para todos los elementos, el nivel nutricional es de crecimiento óptimo con excepción del P en el que se presentó nivel de suficiencia.

La asociación de los índices parciales resulta muy conveniente para indicar la calidad del suelo, ya que se integran propiedades (indicadores) de diferentes grupos de parámetros y refleja de manera integral los procesos y relaciones entre los ciclos de los nutrimentos y su disponibilidad con respecto a propiedades como el pH.

La MOS, Ca, CBM y Actividad fosfatásica, se proponen como indicadores de calidad del suelo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Pennock y Kessel 1997 y Wick *et al.*, 1998.

A pesar de la diferencia entre los enfoques de cada estudio, Bautista (2001), coincide en proponer al pH, Ca y al CO como indicadores de calidad del suelo. Castillo (2002) también reportó al pH, Ca y K como indicadores de calidad.

Con respecto al estado nutrimental de las especies del género *Pinus sp*, los resultados encontrados no muestran una relación clara entre este y calidad del suelo. Ya que las concentraciones en la masa foliar de todos los elementos estudiados, excepto para P, se encontraron en una concentración que se ubicó en un intervalo para crecimiento óptimo según la escala propuesta por Touzet (1987). Un óptimo estado nutrimental del género *Pinus* que se asocie con la mejor calidad del suelo, con base en los resultados obtenidos no se pudo confirmar, dada la tendencia que tienen los procesos implicados dentro del ecosistema para llevar a éste al equilibrio, aunado con la estrategia de adaptación (tipo I) que está relacionada con una baja tasa de absorción de nutrimentos y alta longevidad foliar, que presenta el género, así pues el efecto de la calidad del suelo podría ser más notorio en plantas anuales de rápido crecimiento (tipo II). Sin embargo para P que se encontró en nivel de deficiencia o deficiencia extrema en casi el 100% de los casos y Mg en nivel de deficiencia en más del 50%, son elementos que sí podrían utilizarse como indicadores de calidad del suelo, dada la importancia que tienen estos, el P como fuente principal de las funciones energéticas en el metabolismo de estas especies y el Mg como un elemento esencial para la fotosíntesis (Pritchett, 1991; Marschner, 1995).

7. CONCLUSIONES

Con base en el objetivo general planteado se encontró con el análisis de los resultados de esta investigación que el % de humedad, el pH activo, el % de arena, CO, Ca, K, CBM, la actividad fosfatásica ácida y la presencia de bacterias y algas, fueron las propiedades más sensibles, debido a que estos presentan una relativa facilidad para medirse, reflejan las condiciones naturales del suelo, son sencillos de entender y resultan muy prácticos, por lo que se proponen para ser usados como indicadores de la calidad de suelos forestales con características similares a los estudiados.

Los tipos de suelo más abundantes en el declive occidental del PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl son Regosoles y Andisoles ya que están en el 80% de los sitios visitados. Se encontraron además Fluvisoles, Litosoles y Cambisoles.

Para el ICS_(físico), el sitio con mejor calidad fue el denominado O1, con valor de pH activo cercano a la neutralidad. El sitio con la menor calidad, fue el sitio W de D 14, el cual presentó menor % de humedad superficial y de EP debido a su alto % de la fracción arena y con todo esto, condiciones menos favorables para el desarrollo vegetal. Se encontró que los % de humedad y arena y el pH_{activo} explicaron el 79% de la varianza entre todos los datos de los parámetros físicos de los doce sitios de observación.

El sitio con mejor calidad para el ICS_(químico) fue Coronilla que tuvo el máximo valor de MOS, que influyó a su vez en un adecuado % de N. En segundo lugar de calidad y en correspondencia con el ICS_(físicos), lo tuvo O1, sitio con valores mayores tanto en CI y P_{disponible}. El sitio de menor calidad fue W de D 14, lugar que tuvo los % de MOS, N, y CI más bajos. Para los parámetros químicos, se encontró que el CO, el Ca y el K, explican el 85% de la varianza entre todos los datos de los doce sitios de observación. Estas tres variables relacionadas con la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrimentos, permite asignar un estado de fertilidad edáfica acerca de las condiciones nutrimentales en las que se desarrolla la vegetación y las comunidades microbianas.

El ICS_(biológico), presentó al sitio O1 como el de mejor calidad, el cual tuvo la mayor abundancia de colonias microbianas, lo que habla de condiciones edáficas favorables para el desarrollo y actividad microbiana de las mismas. El sitio con menor calidad fue F2. Del grupo

indicadores biológicos, la presencia de bacterias y algas, explicaron el 74% de la varianza entre todos los datos de los doce sitios de observación. Estas poblaciones definieron a los CP de este grupo de variables. Se encontró efecto del pH, CE, P disponible y CI sobre el desarrollo de estas poblaciones, lo que ratifica su importancia como indicadores de calidad edáfica.

El ICS_(bioquímico) confirmó que O1 es el sitio con mejor calidad del suelo, ya que mostró las mejores cualidades edáficas, como son el pH_{activo}, CE, P, CI, CO₂ y presencia de las poblaciones microbianas. De los parámetros bioquímicos, se propone al CBM y la actividad fosfatásica ácida como indicadores de calidad, ya que entre ambos propiedades explican el 72.1% de la varianza entre todos los datos de los doce sitios de observación.

La propuesta del índice de calidad, integra y relaciona parámetros físicos, químicos, bioquímicos y biológicos, lo que permite el uso de un gran número de indicadores de diferente magnitud que se integraron en la siguiente ecuación;

$$[CS = ICS_{(físico)} + ICS_{(químico)} + ICS_{(biológico)} + ICS_{(bioquímico)}]$$

De la estimación de nutrientes como reserva en mantillo se encontró que el % de N aumentó con respecto a la altitud, para el P, se encontraron a lo largo del gradiente valores alrededor de 0.04% (valores muy bajos respecto al N), lo que dio relaciones N/P entre 20:1 y 32:1 por lo que el P en estos sitios, es el factor limitante.

El K, Ca y el Mg presentaron a lo largo del gradiente altitudinal concentraciones entre 0.1, 6.5 y 0.2% respectivamente.

Con los resultados encontrados, se tienen elementos para aceptar las hipótesis propuestas:

- i) La MOS, el pH y la textura si se pueden utilizar como indicadores de calidad del suelo.
- ii) Los sitios tienen menor calidad edáfica en los límites del Parque Nacional con los asentamientos humanos.

Con los resultados para el estado nutricional del género *Pinus*, se encontró que no existen elementos para rechazar la tercera hipótesis de que, la calidad del suelo pueda evaluarse con base en las concentraciones de nutrientes, aunque el P y el Mg pueden limitar el desarrollo de los individuos de este género y solo en O1 no hubo deficiencia de estos elementos.

COMENTARIOS Y SUGERENCIAS

Con base en los resultados de esta investigación en la que se observó que la textura influyó en porcentaje de humedad del suelo, se sugiere afinar la precisión para determinar éste parámetro, probablemente con uso de la técnica de la pipeta, así como conocer las curvas de retención de humedad de los suelos.

Al considerar que los suelos estudiados son en su mayoría ácidos y de origen volcánico, es importante hacer las determinaciones de acidez hidrolítica, contenido de alogano y aluminio intercambiable.

En referencia a los resultados de la presencia de poblaciones microbianas, determinadas con técnicas cualitativas y que resultaron muy importantes como indicadores de calidad del suelo, se sugiere la cuantificación de ellas con base en medios de cultivo in vitro.

De las técnicas bioquímicas, se sugiere la determinación, además de las fosfatasa, de otras enzimas del suelo como las relacionadas con el N el C y el S (ureasa, deshidrogenasa, arilsulfatasa etc.).

En esta investigación no se reportan los resultados del fraccionamiento de la MOS, los cuales reflejan su estado respecto a su degradación y con ello la dinámica de los nutrimento sin embargo se deberá relacionar con los indicadores del suelo.

En esta investigación se encontraron resultados importantes sobre concentración nutrimental en Pinus. Otro aporte sobre este tema será hacer estimaciones de biomasa foliar para realizar estimaciones sobre la eficiencia de uso de los nutrimentos (EUN).



8. LITERATURA CITADA

- Allan, J. E. 1971. The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy. Varian Techtron, Walnut Creek, California, USA.
- Anaya, A. 1962. Estudio de las relaciones entre la vegetación forestal. El suelo y algunos factores climáticos en seis sitios del declive occidental del Iztaccihuatl. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Atlas, R. M. and Bartha, R. 1987. Microbial ecology fundamentals and application. Benjamín/Cummings. Publishing Company, Inc.
- Bautista, C. A. A. 2001. Indicadores de calidad del suelo en tres cronosecuencias de bosque mesófilo, Sierra Norte, Oaxaca. Tesis M. en C. Colegio de Postgraduados. México.
- Bockheim, J. G. 1991. Suelos forestales. pp. 119-139. In: Young R. A. (ed.). Noriega Editores. México
- Bonner, J y A. Galston. 1975 Principios de fisiología vegetal. Ed. Aguilar. España
- Bray, R. H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available phosphorus in soil. Soil Sci. 59: 39-45.
- Bremmer, J. M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149 - 1178. In: C.A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Part 2, Agronomy 9. America Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. U.S.A.
- Calderón, R. G. y J. Rzedowski. 2001. Flora fanerogámica del valle de México. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y el uso de la biodiversidad. 2ª edición. México.
- Castillo, V. A. 2002. Indicadores de calidad del suelo, estado nutrimental y calidad de fruto en huertos de aguacate cv. hass con manejo orgánico. Tesis M en C. Colegio de Postgraduados. México.
- Cervantes, A. y P. Rivera. 1993. Estadística multivariada en Biología. (Curso) ENEP Zaragoza, UNAM. México.
- Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. pp. 891 - 901. In C. A. Black (ed.). Methods of analysis. Part 2 Agronomy 9. American Society of agronomy. Madison, Wisconsin. U.S.A.

- Cruz-Flores, G. 2003. Mecanismos de adaptación de la raíz de cereales ante estrés nutrimental en suelos ácidos. Tesis Doctorado. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Devlin, R y F. Witham. 1983. Plant Physiology. Ed. Wadsworth Publishing Company. Belmont, California, U.S.A.
- Domínguez, R. I y N. Aguilera H. 1982. Metodología de análisis físicos y químicos de suelos. UNAM. Facultad de Ciencias-Biología 34 p.
- Doran, J. W. y T. B. Parkin. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. pp. 3-22. In: J. Doran, Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (ed.). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment SSSA Special Publication no. 35. Wisconsin, U.S.A.
- Enkerlin H., E. C. 1997. Suelo y agua. pp. 235-246. In: E. Enkerlin., G. Cano., R. Garza., E. Vogel. (ed.). Ciencia ambiental y Desarrollo sostenible. Internacional THOMSON. México.
- Escamilla, M. E. 1996. La vegetación alpina y subalpina del declive occidental del volcán Popocatepetl, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Etchevers, J. D., M. A. Bautista y M. A. Vergara. 2000. Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono. Pp.507-520. In: R. Quintero - Lizaola, T. Reyna - Trujillo, L. Corlay Chee. A. Ibañez - Huerta y N. E. García - Calderón. (ed). La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II. Colegio de Postgraduados, UNAM, UACH. México.
- Fassbender, H. W. y E. Bornemiza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América latina. ed. IICA. Costa Rica.
- Franzluebber, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil & Tillage Research 66: 95-106.
- Garrido, S. 2003. Análisis espacial y Geoestadístico de los suelos de la zona henequenera con carsticos del estado de Yucatán. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM. México.
- Gavande, S.A. 1982. Física de suelos. Limusa. México.
- Grime, P. 1982. Plant strategies and vegetation processes. John Wiley and Sons Ltd. U.S.A.
- Harris, P. J. 1992. Ecología de la población del suelo. pp.495-526. In: P. Urbano, C. Hernández. (ed.). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

- Herbien, S y J. Neal. 1990. Soil pH y phosphatase activity. *Commun in soil SCI plant anal.* 21(5 y 6). Virginia, U.S.A.
- Himes, F. L. 1998. Nitrogen, Sulfur, and Phosphorus and the Sequestering of Carbon. pp. 315-320. In: Rattan, L., J.M. Kimble, R. F. Follett. B.A. Stewart. (ed.). *Soil processes and the carbon cycle.* CRC. U.S.A.
- Hopkins, W. 1995. *Introduction to plant physiology.* Ed. John Wiley y Sons, INC. U.S.A.
- Horwath, R. W. and E. A. Paul. 1994. Microbial Biomass. pp. 754-774. In: R. W. Weaver, J. S. Angle, P. S. Bottomley, D. Bezdicek, S. Smith, A. Tabatabai, A. Wollum. (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. Number 5 in the Soil Science Society of America Book Series.* USA.
- Jackson, M. L. 1964. *Análisis químico de suelos.* Traducción al español de J. Beltrán. Omega. Barcelona, España.
- Johnson, D.E. 2000. *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos.* Traducción al español de H. Pérez. Thompson Editores. México.
- Larson, W.E. y F.J. Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. Pp. 37-51. In: J. Doran, Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (ed.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment SSSA Special Publication no. 35.* Wisconsin, U.S.A.
- López L. M. A. 1997. Efectos del ambiente aéreo y del suelo sobre el desarrollo de síntomas de declinación de Oyamel. *Terra* 15: 287-293.
- Maldonado, R. T., J. D. Etchevers B., G. Alcantar G., J. Rodríguez A. y M. T. Colinas L. 2001. Estado nutrimental del limón mexicano en suelos calcimórficos. *Terra* 19: 163-174.
- Masera, O., M. Astier, S. López. 2000. *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMI.* Mundi Prensa. México.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants.* Academic Press. U.S.A.
- Munsell. 1975. *Soil color charts.* De. Kollmorgan corp. Maryland.
- Núñez, Q. S. 1998. *Producción de hojarasca, dinámica del mantillo, descomposición foliar y potencial microbiano del suelo, en tres comunidades contrastantes del desierto sonorense.* Tesis de maestría. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Ocegueda, C. S. 1991. *El análisis estadístico Cluster, métodos y aplicaciones en biología.* Tesis de licenciatura. ENEP. Zaragoza.

- Palmer, G. R. y F.R. Truch. 1989. Introducción a la ciencia del suelo. Manual de laboratorio. AGT Eds. México.
- Pennock, J. D. and V. C. Kessel. 1997. Clear cut forest harvest impacts no soil quality indicators in the mixedwood forest of Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 15: 13-32.
- Pérez, C. 1996. Econometría y análisis estadístico multivariable con Statgraphics, técnicas avanzadas. RA-MA. México.
- Powlson, D. S., P. C. Brookes and B. T. Christensen. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19 (2): 159-164. Great Britain.
- Pritchett, W. L. 1991. Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa, México.
- Raven, P. H., R. F. Evert y S. E. Eichhorn. 1991. Biología de las plantas. Reverté, S.A. Barcelona, España.
- Rencher, A. 1995. Methods of multivariate analysis. John Wiley and sons. USA.
- Richards, L. A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6ª ed., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Limusa, México.
- Rivera, G. 1989. Contribución al estudio fitoecológico del parque cultural y recreativo Desierto de los Leones. Tesis de licenciatura. ENEP Zaragoza. UNAM. México.
- Rivera, G. P. 1991. El análisis de distancia como una herramienta para la investigación biológica. Tesis de Licenciatura. ENEP Zaragoza, UNAM. México.
- Ross, D. J. 1989. Estimation of soil microbial C by a fumigation-extraction procedure: influence of soil moisture content. *Soil Biol. Biochem.* 21(6): 767- 772.
- Rzedowski, J. 1978. La vegetación de México. Limusa. México.
- Salisbury, F.B. y C.Ross. 2000. fisiología de las plantas. Thomson Learning. España.
- Santamarina, P. P., F. J. García, J. Roselló. 1997. Biología y Botánica. Tomo II. Universidad Politécnica de Valencia. REPROVAL. España.
- SARH. 1993. Diagnóstico del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl, México, Puebla, Morelos. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. Consultores en Ecología y Medio Ambiente. 52 páginas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Seybold, C.A., M.J. Mausbach, D.L. Karlen y H.H. Rogers, 1997. Quantification of soil quality. pp. 387-404. In: Rattan, L., J.M. Kimble, R. F. Follett, B.A. Stewart. (ed.). Soil processes and the carbon cycle. CRC. U.S.A.
- Shan-Min, S. Brookes, P. C., and Jenkinson, D. S. 1987. Soil respiration and the measurement of microbial biomass C by the fumigation technique in fresh and in air-dried soil. Soil Biol. Biochem.
- Tabatabai, M. 1994. Soil Enzymes. in R.W. Weaver, J.S. Angle and P.S. Bottomley. 1994. Methods of Soil Analysis. Part 2 Microbiological and Biochemical Properties. Soil Science of America. U.S.A.
- Tisdale, S.L. y W. Nelson. 1988. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. UTEHA. México.
- Touzet, G. 1987. Temperate forest species. In Martin-Prével P., J. Gagnard and P. Gautier (Eds). Plant analysis. As guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crops. Lavoisier Publishing Inc. New York, N.Y., USA.
- Turco, R.F., A.C. Kennedy and M. D. Jawson. 1994. Microbial Indicators of Soil Quality. pp. 73-90. In: Doran J., Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (Ed.). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSA Special Publication no. 35. Wisconsin, U.S.A.
- USDA. 1997. Glossary of Soil Science Terms. SSSA, Madison Wisconsin. USA. <http://soil.usda.gov/sqi/glossary.htm> Consultada el 2 de junio de 2003.
- USDA. 1998. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de agricultura, servicio de investigación agrícola, Servicios de recursos naturales e Instituto de calidad de suelos. Traducción al español por Alberto Lutens y Juan Carlos Salazar Lea Plaza del instituto de suelos, Argentina. <http://soil.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>. Consultada el 15 de enero de 2003.
- USDA-NRCS. 1996. Indicators for Soil Quality evaluation. Soil quality information Sheet. http://soil.usda.gov/sqi/files/sq_htr_2.pdf Consultada el 29 de mayo de 2003.
- USDA-NRCS. 1997. Effect of soil quality on nutrient efficiency. Soil quality-Agronomy. Technical note #4. <http://soil.usda.gov/sqi/files/agronomy4.pdf>. Consultado el 10 de junio de 2003.
- USDA-NRCS. 1998. Soil quality indicators: pH. Soil quality information sheet. <http://soil.usda.gov/sqi/files/indicate.pdf>. Consultada el 14 de junio de 2003.

- Vargas, M. F. 1984. **Parques Nacionales de México y Reservas Equivalentes. Pasado, presente y futuro. Colección: Grandes problemas Nacionales. Serie: Los Bosques de México. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM. México.**
- Wick, B., R. Kühne and P. Vlek. 1998. **Soil microbiological parameters as indicators of soil quality under improved fallow management system in south-western Nigeria. Plant and Soil 202: 97-107.**
- Wolt, J. D. 1994. **Soil Solution Chemistry. Application to environmental science and agriculture. John Wiley and Sons, Inc. USA.**
- WRB, FAO-ISRIC-ISSS. 1998. **Rome, Italy**

TESIS CON
FALLA DE CARGEN

FÓSFORO EXTRACTABLE (BRAY – 1 , BRAY Y KURTZ). (ANEXO 1)

Método ampliamente usado como índice de fósforo disponible en suelos ácidos, su extractante usa NH_4F que remueve el fósforo fácilmente soluble (fosfatos de aluminio, hierro y fuertemente ligado a calcio). Este extractante disuelve a esos fosfatos por formación de complejos con esos metales en soluciones ácidas. Este método no es apropiado para suelos con alto contenido de CaCO_3 por que el carbonato en alto contenido neutraliza el efecto de la acidez del extractante y se subestima la cantidad real de P-disponible. El método original utiliza SnCl_2 como agente reductor.

Material y equipo

- Tubos con tapa
- Agitador mecánico oscilatorio
- Embudos de talle corto
- Tubos de ensayo 25 x 200 mm.
- Bureta
- Micropipeta
- Algodón
- Película de plástico
- Espectrofotómetro (colorímetro)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Reactivos

- Solución extractora Bray-1 (Floruro de amonio 0.03 M). Disolver 1.11 g de NH_4F en 900 ml de agua destilada, se adicionan 2.08 ml de HCl concentrado y se afora a 1 L.
- Reactivo A. Disolver 6 g de molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ en 125 ml de agua destilada. Disolver 0.1454 g de tartrato de antimonio y potasio $[\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6]$ en 50 ml de agua destilada. Tomar 70 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y aforar a 500 ml (H_2SO_4 2.5 M). Mezclar fuertemente estas tres soluciones aforar a 1000 ml con agua destilada y almacenar en frasco ámbar en un lugar frío.
- Reactivo B. Disolver 1.056 g de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) en 200 ml de reactivo A y mezclar fuertemente. Preparar esta solución en el momento y en las cantidades requeridas.

- Estándar de Fósforo de 200 ppm. Se disuelven 0.08787 g de fosfato de dihidrógeno de potasio (KH_2PO_4 , secado a 105°C durante 2 horas) en agua destilada y se afora a 100 mL. Guardar en refrigeración en frasco de plástico.
- Solución de fósforo 4 ppm. Tomar 1.0 mL del estándar (200ppm) y aforar a 50 mL con agua destilada.

Procedimiento

Extracción:

1. Pesarse 0.5 g de suelo seco al aire y tamizado en malla de 2 mm y colocarlo en un tubo con tapa.
2. Adicionarle 10 mL de la solución extractora, sellar con película plástica y tapar el tubo.
3. Agitar a 148 r.p.m. en posición horizontal por 6 minutos.
4. Empacar embudos con algodón y filtrar antes de 10 minutos en Tubos de ensayo 25 x 200 mm.

Desarrollo de color:

1. Tomar 0.5 mL del extracto y agregar
2. 10.5 mL de agua destilada.
3. 4 mL de ácido ascórbico (reactivo B).
4. 10 mL de agua destilada (volumen final 25 ml). Después de 10 minutos, leer a 882 nm en el espectrofotómetro.

Bajo los mismos tiempos de las muestras, preparar curva de calibración como se indica:

Solución de P (4 ppm)	Agua	Solución Extractante	Reactivo B	[P ppm]
	mL			
0	6.0	2	2	0.0
0.5	5.0	2	2	0.2
1.0	4.0	2	2	0.4
2.0	3.0	2	2	0.8
4	2.0	2	2	1.6
5	1.0	2	2	2.0

Cálculos

$P \text{ (mg/kg)} = (\text{ppm en C.C.}) (Dm) (Dv)$

Donde:

ppm C.C. = partes por millón en la curva de calibración.

Dv = dilución de volumen (aforo/alícuota).

Dm = dilución de masa (volumen del extractante/g de muestra).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ACTIVIDAD FOSFATÁSICA EN SUELO**(ANEXO 2)****Reactivos:**

- 1 Tolueno (reactivo certificado).
- 2 Buffer Universal Modificado MUB Solución Stock:
Disolver 12.1 g de TRIS (hidroximetil) aminometano (THAM), 11.6 g de Ácido maleico, 14 g de Ácido cítrico y 6.3 g de Ácido bórico en 488 mL de NaOH 1N y diluir la solución a 1 L con agua desionizada. Guardar en refrigerador.
- 3 Buffer Universal Modificado MUB, pH 5.5 (Fosfatasa ácida) y pH 11 (fosfatasa alcalina).
Tomar y colocar 200 mL de MUB (solución STOCK) en un matraz aforado 1000 mL. Introducir una barra magnética y colocar en un agitador magnético. Llevar la solución a pH 5.5 o a 11 con HCl 0.1N o NaOH 0.1N para los ensayos de fosfatasa ácida o alcalina respectivamente. Guardar en refrigerador
- 4 Solución de p-Nitrofenil fosfato 3 mM.
Para 50 mL de solución: Disolver, la cantidad apropiada de sal disódica de p-Nitrofenil fosfato tetrahidratada en 40 mL de MUB, pH 5.5 u 11 para ensayos de fosfatasa ácida o alcalina respectivamente, aforar la solución con MUB del mismo pH. Guardar en refrigerador.
- 5 Cloruro de calcio 0.5 M.
Disolver 73.5 g de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en cerca de 700 mL de agua y diluir a un volumen de 1 L con agua. Guardar en refrigerador
- 6 Hidróxido de sodio 0.5 M
Disolver 20 g de NaOH en cerca de 200 mL de agua y diluir la solución a 1 L de agua. Guardar en refrigerador.
- 7 Solución ESTANDAR de p-Nitrofenol.
Disolver 1 g de p-Nitrofenol en cerca de 70 mL de agua y diluir la solución a 1 L de agua. Guardar en refrigerador

Procedimiento

Colocar 1 g de suelo en un Mortero.

Adicionar 0.2 mL de tolueno y 2 mL de MUB pH 5.5 u 11

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agregar unos granos de arena de cuarzo y macerar hasta homogeneización

Tomar alícuota de 0.3 mL de homogeneizado y colocarla en tubos o frascos para incubación

Adicionar 4 mL de MUB pH 5.5 u 11

Agregar 1 mL de p-Nitrofenilfosfato 3 mM

Tapar e incubar en Baño María a 37 °C durante 1 h

Remover el tapón y agregar 1 mL de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 M

Adicionar 4 mL de NaOH 0.5 M

Agitar y filtrar la suspensión con papel Whatman No 2

Leer a 400 nm y comparar la actividad enzimática con base en una curva de calibración que contenga 0, 10, 20, 30, 40 y 50 µg de p-Nitrofenol

Curva de calibración

Para preparar esta curva:

Coloque 1 mL de la solución estándar de p-Nitrofenol en matraz volumétrico de 100 mL y después de aforar con agua, mezcle fuertemente.

De ésta última solución de p-Nitrofenol, pipetear alícuotas de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 mL .

Ajustar el volumen a 5 mL con adición de agua y proceder a incubar como cualquier otra muestra

(Agregar 1 mL de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 M y 4 mL de NaOH 0.5 M)

Aforar a 50 mL, mezclar y filtrar la suspensión resultante.

Si la intensidad del color del filtrado en las muestras excede la de los 50 µg de p-Nitrofenol; una alícuota del filtrado puede ser diluida con agua hasta que el colorímetro pueda leer dentro de los límites de la curva de calibración.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Evolución de Bióxido de Carbono (ANEXO 3)

El método de fumigación e incubación se basa en que, cuando un suelo se esteriliza con cloroformo y después se reinocula con una pequeña dosis de suelo fresco, las células microbianas destruidas actuarán como sustrato carbonado y durante su descomposición desprenderán, en forma de CO_2 , una proporción de sus componentes carbonados que, además, resulta razonablemente constante. Midiendo el CO_2 desprendido por determinadas células microbianas añadidas al suelo, en condiciones normalizadas, utilizando un factor, se permite el cálculo de la biomasa a partir de las medidas del CO_2 desprendido (Harris, 1992).

Procedimiento:

1. Hacer pasar suelo fresco (con la humedad que presenta en campo) por una malla de 2 mm de abertura para eliminar restos orgánicos.
2. Separar la muestra en dos fracciones, 1 (suelo para fumigar) y 2 (suelo natural) pesando 20 g para cada fracción y colocarlas en frascos de vidrio con tapa hermética.
3. A la fracción 1, se le adicionan 5 mL de cloroformo y a la 2, 5 mL de agua esterilizada, se cierran y se mantienen así por 48 h. Terminada la fumigación, se abren los frascos y se colocan en baño maría a 40 °C, hasta que el cloroformo se elimine. Ambos suelos (fumigado y natural) se reinoculan con 1 g de suelo natural.
4. A las dos fracciones se les agrega la cantidad necesaria de agua para llevar las muestra a capacidad de campo.
*Notas: El suministro de agua se hará mL por mL.
Las muestras del mismo lugar, deben llevar la misma cantidad de agua.*
5. Se introduce en cada frasco un tubo de ensaye que contenga 7 mL de KOH 0.5 N y una tira de papel filtro procurando que la longitud de ésta sea ligeramente mayor que la del tubo.
6. *Colocar para corrección de la normalidad, un blanco absoluto (frasco que contenga un tubo con sólo 7 mL de KOH 0.5 N). Hacer esto por duplicado.
7. Cerrar los frascos e incubar entre 35 y 37 °C, por el tiempo establecido previamente por el analista (10, 20, etc. días).
8. Al término de la incubación sacar los frascos de la estufa. Sacar el tubo de ensaye y transferir todo su contenido en un matraz Erlenmeyer de 50 mL. Enjuagar el tubo con 1 mL de agua libre de CO_2 .

9. Colocar 2 o 3 gotas de fenolftaleína como indicador y proceder a titular con HCl 0.5 N. Incluir un blanco de titulación.
10. Realizar los cálculos para determinar los mg de CO₂ producidos y de carbono en biomasa microbiana.

Cálculos

Calcular los miliequivalentes de KOH en el blanco y en las muestras problema.
(Normalidad del ácido)(mL gastados en la titulación) = meq KOH

Obtener los miliequivalentes de KOH transformados en K₂CO₃.
meq blanco - meq muestra = meq K₂CO₃

Igualar unidades a equivalentes químicos.
meq K₂CO₃ / 1000 = eq K₂CO₃

A partir de esto, obtener gramos de K₂CO₃ formados.
(eq K₂CO₃)(PM K₂CO₃ / # H sust) = g de K₂CO₃

Por estequiometría se obtienen los miligramos de CO₂.
[(g de K₂CO₃) (PM CO₂) / PM K₂CO₃] 1000 = mg CO₂

Por último obtener el peso del carbono en la biomasa microbiana (CBM).
(mg CO₂ suelo fumigado - mg CO₂ suelo natural) / 0.45 = CBM mg

* Nota personal, Cruz Flores y Granados 2002.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS MULTIVARIADO

(PARÁMETROS FÍSICOS) (ANEXO 4A)

Análisis de componentes principales

Data variables:

SPhum
 SpH1
 SpH2
 Sc.e.
 Sd.a.
 Sd.r.
 SPe.p.
 SParena
 SPlimo
 SParcilla

Dict input: observations

Number of complete cases: 12

Missing value treatment: listwise

Standardized: yes

Number of components extracted: 3

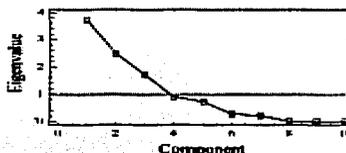
Principal Components Analysis

Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	3.73019	37.302	37.302
2	2.47018	24.702	62.004
3	1.7177	17.177	79.181
4	0.898322	8.983	88.164
5	0.710295	7.103	95.267
6	0.260551	2.605	97.872
7	0.202616	2.026	99.899
8	0.00854542	0.085	99.984
9	0.00160392	0.016	100.000
10	6.96133E-17	0.000	100.000

The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 10 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 3 components have been extracted, since 1888 components had eigenvalues greater than or equal to 1.0. Together they account for 79.1807% of the variability in the original data.

Scree Plot



El sistema realiza un gráfico de dispersión para los dos primeros componentes

Table of Component Weights

	Component 1	Component 2	Component 3
SPhum	0.42865	-0.0934413	-0.288546
SpH1	0.201702	0.338917	0.148393
SpH2	0.320939	0.452138	0.161184
Sc.e.	0.341123	0.365943	-0.0902793
Sd.a.	-0.411437	0.212647	0.346883
Sd.r.	-0.191322	0.353001	0.257127
SPe.p.	0.375202	0.0170068	-0.241554
SParena	0.228004	-0.309305	0.306752
SPlimo	0.253667	-0.139215	0.50166
SParcilla	-0.305311	0.27613	-0.518811

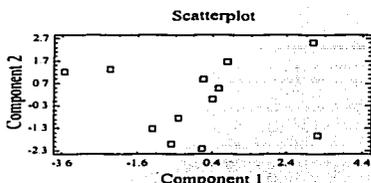
The StatAdvisor

This table shows the equations of the principal components. For example, the first principal component has the equation

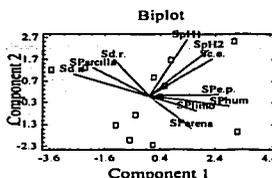
$$0.42865 * SPhum + 0.201702 * SpH1 + 0.320939 * SpH2 + 0.341123 * Sc.e. - 0.411437 * Sd.a. - 0.191322 * Sd.r. + 0.375202 * SPe.p. + 0.228004 * SParena + 0.253667 * SPlimo - 0.305311 * SParcilla$$

where the values of the variables in the equation are standardized by subtracting their means and dividing by their standard deviations.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



El sistema realiza un gráfico de dispersión para los dos primeros componentes principales.



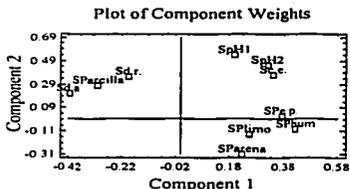
El sistema realiza un gráfico de representación de los componentes principales, centrados en el origen de coordenadas y con una línea para cada variable que refleja su contribución a las componentes.

Table of Principal Components

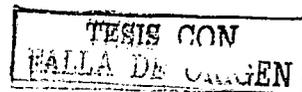
Row	Component 1	Component 2	Component 3
1	-3.55379	1.18859	0.0634059
2	3.19863	-1.60428	1.87064
3	-2.34265	1.3285	0.803399
4	0.155268	0.873647	2.41272
5	0.77403	1.65163	-1.00108
6	3.06271	2.5179	-0.43301
7	-0.50632	-0.8458	-0.678061
8	-0.691914	-1.99354	0.511146
9	-1.20007	-1.3132	0.674065
10	0.568712	0.464661	-0.786794
11	0.129766	-2.22663	-1.85245
12	0.405631	-0.0414856	-1.58398

The StatAdvisor

This table shows the values of the principal components for each row of your data file. Select Component Weights from the list of Tabular Options to obtain the equations for each component. Select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options to plot this data. You may save the components by pressing the fourth button from the left on the analysis toolbar.



El sistema gráfica pesos de los dos primeros componentes con un punto para cada variable.



Análisis de cluster

Data variables:

SPHum
 SpH1
 SpH2
 Sc.e.
 Sd.a.
 Sd.r.
 Spe.p.
 SParena
 SPLimo
 SParcilla

Number of complete cases: 12

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)

Distance Metric: Squared Euclidean

Cluster Members Percent

Cluster	Members	Percent
1	12	100.00

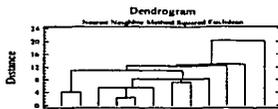
Centroids

Cluster	SPHum	SpH1	SpH2	Sc.e.	Sd.a.
1	3.16833	5.98333	4.6275	0.0541667	1.0325

Cluster	Sd.r.	Spe.p.	SParena	SPLimo	SParcilla
1	2.33333	55.7417	7.33333	20.6667	72.0

The StatAdvisor

This procedure has created 1 cluster from the 12 observations supplied. The clusters are groups of observations with similar characteristics. To form the clusters, the procedure began with each observation in a separate group. It then combined the two observations which were closest together to form a new group. After recomputing the distance between the groups, the two groups then closest together were combined. This process was repeated until only 1 group remained. To specify the number of final clusters, press the alternate mouse button and select Analysis Options. To determine a reasonable value for the number of clusters, look at the Agglomeration Distance Plot available from the list of Graphical Options.



Membership Table

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)
 Distance Metric: Squared Euclidean

Row	Cluster
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1

The StatAdvisor

This table shows which cluster each observation belongs to. To plot these results, select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Agglomeration Schedule

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)
Distance Metric: Squared Euclidean

Stage	Clusters Cluster 1	Combined Cluster 2	Coefficient	Stage First Cluster 1	Appears Cluster 2	Next Stage
1	10	12	2.42948	0	0	3
2	1	3	4.18557	0	0	8
3	5	10	5.56989	0	1	4
4	5	11	5.58347	3	0	6
5	7	9	7.37693	0	0	6
6	5	7	8.14488	4	5	7
7	5	8	8.2617	6	0	8
8	1	5	10.8684	2	7	9
9	1	4	12.3964	8	0	10
10	1	6	12.971	9	0	11
11	1	2	20.2232	10	0	0

Cluster Number	Smallest Row
1	1

The StatAdvisor

The agglomeration schedule shows which observations were combined at each stage of the clustering process. For example, in the first stage, observation 10 was combined with observation 12. The distance between the groups when combined was 2.42948. It also shows that the next stage at which this combined group was further combined with another cluster was stage 3.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

(PARÁMETROS QUÍMICOS) (ANEXO 4B)**Análisis de componentes principales**

Data variables:

SPm.o.
Sc.organico
Snitrog
Sc_n
SPazufre
SPfosforo
SPnitrog
Sfosfo.asimi
Ssodio
Spotasio
Scalcio
Smagnesio

Data input: observations
Number of complete cases: 12
Missing value treatment: listwise
Standardized: yes

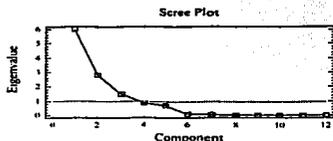
Number of components extracted: 3

Principal Components Analysis

Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	5.98387	49.866	49.866
2	2.82181	23.515	73.381
3	1.46371	12.198	85.578
4	0.87901	7.325	92.903
5	0.684867	5.707	98.611
6	0.114311	0.953	99.563
7	0.0436103	0.363	99.927
8	0.00837371	0.070	99.996
9	0.000430962	0.004	100.000
10	2.90929E-7	0.000	100.000
11	2.49261E-7	0.000	100.000
12	0.0	0.000	100.000

The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 12 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 3 components have been extracted, since 1888 components had eigenvalues greater than or equal to 1.0. Together they account for 85.5783% of the variability in the original data.

**Table of Component Weights**

	Component 1	Component 2	Component 3

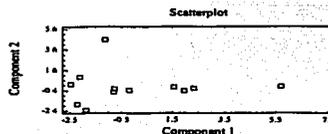
SPm.o.	0.40403	0.00877619	0.112752
Sc.organico	0.404047	0.00867741	0.112587
Snitrog	0.288499	0.246782	-0.291116
Sc_n	0.323353	-0.173511	0.290889
SPazufre	0.404112	0.00990493	0.111643
SPfosforo	0.404125	0.00852845	0.111638
SPnitrog	0.308816	0.297565	-0.196575
Sfosfo.asimi	-0.0939891	0.40252	-0.426792
Ssodio	-0.014758	0.3606	0.19798
Spotasio	-0.200372	0.14857	0.582637
Scalcio	0.0114082	0.545441	-
O.00649426			
Smagnesio	-0.119981	0.456608	0.425232

The StatAdvisor

This table shows the equations of the principal components. For example, the first principal component has the equation

$$0.40403 \cdot \text{SPm.o.} + 0.404047 \cdot \text{Sc.organico} + 0.288499 \cdot \text{Snitrog} + 0.323353 \cdot \text{Sc}_n + 0.404112 \cdot \text{SPazufre} + 0.404125 \cdot \text{SPfosforo} + 0.308816 \cdot \text{SPnitrog} - 0.0939891 \cdot \text{sfosfo.asimi} - 0.014758 \cdot \text{Ssodio} - 0.200372 \cdot \text{Spotasio} + 0.0114082 \cdot \text{Scalcio} - 0.119981 \cdot \text{Smagnesio}$$

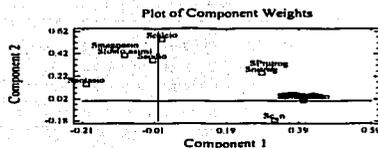
where the values of the variables in the equation are standardized by subtracting their means and dividing by their standard deviations.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

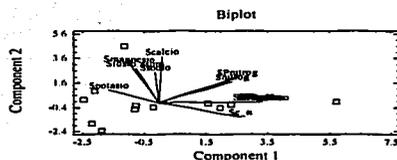
Table of Principal Components

Row	Component 1	Component 2	Component 3
1	-1.876331	-2.324445	-0.768606
2	-2.45077	0.251041	3.15185
3	-2.21447	-1.72419	0.206765
4	-0.790591	-0.54721	-1.35781
5	-2.11249	0.974643	0.422516
6	-1.14263	4.57627	-0.86682
7	-0.213972	-0.377063	-0.124192
8	-0.776939	-0.228059	-0.993708
9	1.98035	-0.423518	-0.404522
10	1.561	-0.0868171	0.0694382
11	5.70592	0.0647793	1.15931
12	2.33092	-0.155421	-0.494223



The StatAdvisor

This table shows the values of the principal components for each row of your data file. Select Component Weights from the list of Tabular Options to obtain the equations for each component. Select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options to plot this data. You may save the components by pressing the fourth button from the left on the analysis toolbar.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Análisis de Cluster

Data Variables:

SPm.o.
 Sc.organico
 Snitrog
 Sc_n
 SPazufre
 SPfosforo
 SPnitrog
 Sfosfo.asimi
 Ssodio
 Spotasio
 Scalcio
 Smagnesio

Number of complete cases: 12
 Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)
 Distance Metric: Squared Euclidean

Cluster	Members	Percent
1	12	100.00

Centroids

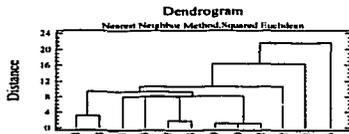
Cluster	SPm.o.	Sc.organico	Snitrog	Sc_n	SPazufre
1	7.32167	76.4375	3.5225	21.0891	1.0925

Cluster	SPfosforo	SPnitrog	Sfosfo.asimi	Ssodio	Spotasio
1	1.52917	0.179167	101.926	1.41083	0.456667

Cluster	Scalcio	Smagnesio
1	0.89	1.38917

The StatAdvisor

This procedure has created 1 cluster from the 12 observations supplied. The clusters are groups of observations with similar characteristics. To form the clusters, the procedure began with each observation in a separate group. It then combined the two observations which were closest together to form a new group. After recomputing the distance between the groups, the two groups then closest together were combined. This process was repeated until only 1 group remained. To specify the number of final clusters, press the alternate mouse button and select Analysis Options. To determine a reasonable value for the number of clusters, look at the Agglomeration Distance Plot available from the list of Graphical Options.



TESIS CON
 FALLA DE URGEN

Membership Table

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)
Distance Metric: Squared Euclidean

Row	Cluster
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1

The StatAdvisor

This table shows which cluster each observation belongs to. To plot these results, select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options.

Agglomeration Schedule

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)
Distance Metric: Squared Euclidean

Stage	Clusters Combined Cluster 1	Cluster 2	Coefficient	Stage First Appears Cluster 1	Cluster 2	Next Stage
1	9	10	1.02448	0	0	2
2	9	12	1.10222	0	0	7
3	7	8	1.66393	0	0	5
4	1	3	3.01815	0	0	8
5	5	7	7.92225	0	3	6
6	4	5	7.94618	0	5	7
7	4	9	8.13814	6	2	8
8	1	4	9.30046	4	7	9
9	1	2	10.6614	8	0	10
10	1	11	16.4014	9	0	11
11	1	6	21.6494	10	0	0

Cluster Smallest
Number Row

1	1
---	---

The StatAdvisor

The agglomeration schedule shows which observations were combined at each stage of the clustering process. For example, in the first stage, observation 9 was combined with observation 10. The distance between the groups when combined was 1.02448. It also shows that the next stage at which this combined group was further combined with another cluster was stage 2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

(PARÁMETROS BIOLÓGICOS) (ANEXO 4C)

Análisis de componentes principales

Data variables:

Sbac
Shon
Sact
Salg

Data input: observations

Number of complete cases: 12
Missing value treatment: listwise
Standardized: yes

Number of components extracted: 2

Principal Components Analysis

Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	1.96023	49.006	49.006
2	1.00103	25.026	74.032
3	0.854729	21.368	95.400
4	0.184007	4.600	100.000

The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 4 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 2 components have been extracted, since 1888 components had eigenvalues greater than or equal to 1.0. Together they account for 74.0316% of the variability in the original data.

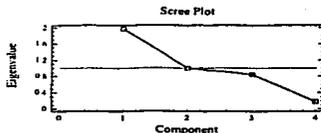


Table of Component Weights

	Component Weights	
	Component 1	Component 2
Sbac	0.640175	-0.31545
Shon	0.626339	-0.0370905
Sact	0.393671	0.0746591
Salg	0.207118	0.945273

The StatAdvisor

This table shows the equations of the principal components. For example, the first principal component has the equation $0.640175 \cdot \text{Sbac} + 0.626339 \cdot \text{Shon} + 0.393671 \cdot \text{Sact} + 0.207118 \cdot \text{Salg}$ where the values of the variables in the equation are standardized by

subtracting their means and dividing by their standard deviations.

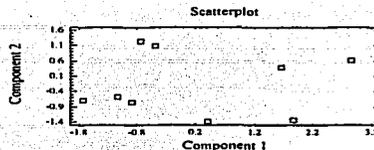
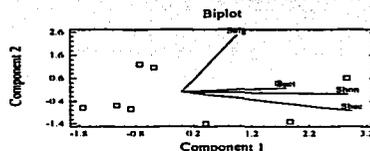
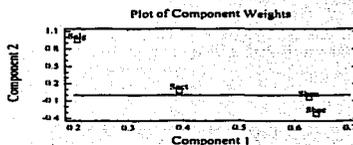


Table of Principal Components

Row	Component 1	Component 2
1	-0.73968	1.23395
2	1.66782	0.381159
3	-0.480448	1.07206
4	-0.877049	-0.738
5	-0.877049	-0.738
6	2.84549	0.604502
7	1.86006	-1.31723
8	-0.480448	1.07206
9	-1.13628	-0.576107
10	-1.72512	-0.687779
11	-0.480448	1.07206
12	0.423153	-1.37868

The StatAdvisor

This table shows the values of the principal components for each row of your data file. Select Component Weights from the list of Tabular Options to obtain the equations for each component. Select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options to plot this data. You may save the components by pressing the fourth button from the left on the analysis toolbar.



Análisis de cluster

Data variables:

Sbac
Shon
Sact
Salg

Number of complete cases: 12

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)

Distance Metric: Squared Euclidean

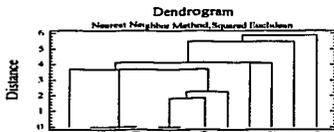
Cluster	Members	Percent
1	12	100.00

Centroids

Cluster	Sbac	Shon	Sact	Salg
1	2.33333	2.0	1.41667	0.5

The StatAdvisor

This procedure has created 1 cluster from the 12 observations supplied. The clusters are groups of observations with similar characteristics. To form the clusters, the procedure began with each observation in a separate group. It then combined the two observations which were closest together to form a new group. After recomputing the distance between the groups, the two groups then closest together were combined. This process was repeated until only 1 group remained. To specify the number of final clusters, press the alternate mouse button and select Analysis Options. To determine a reasonable value for the number of clusters, look at the Agglomeration Distance Plot available from the list of Graphical Options.



Membership Table

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)

Distance Metric: Squared Euclidean

Row	Cluster
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

The StatAdvisor

This table shows which cluster each observation belongs to. To plot these results, select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options.

Agglomeration Schedule

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)
Distance Metric: Squared Euclidean

Stage	Clusters Combined		Coefficient	Stage First Appears		Next Stage
	Cluster 1	Cluster 2		Cluster 1	Cluster 2	
1	3	8	0.0	0	0	2
2	3	11	0.0	1	0	6
3	4	5	0.0	0	0	4
4	4	10	1.83333	3	0	5
5	4	9	2.23729	4	0	6
6	3	4	3.66667	2	5	7
7	1	3	3.66667	0	6	9
8	7	12	4.07062	0	0	9
9	1	7	4.125	7	8	10
10	1	2	5.5	9	0	11
11	1	6	5.90395	10	0	0

Cluster Number	Smallest Row
1	1

The StatAdvisor

The agglomeration schedule shows which observations were combined at each stage of the clustering process. For example, in the first stage, observation 3 was combined with observation 8. The distance between the groups when combined was 0.0. It also shows that the next stage at which this combined group was further combined with another cluster was stage 2.

TESIS COM
FALLA DE ORIGEN

(PARÁMETROS BIOQUÍMICOS) (ANEXO 4D)

Análisis de componentes principales

Data variables:

Sco2
Scbm
Sfas5
Sfas11

Data input: observations
Number of complete cases: 12
Missing value treatment: listwise
Standardized: yes
Number of components extracted: 2

Principal Components Analysis

Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	1.9319	48.298	48.298
2	0.95266	23.816	72.114
3	0.777518	19.438	91.552
4	0.337922	8.448	100.000

The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 4 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 2 components have been extracted, since 1888 components had eigenvalues greater than or equal to 0.8. Together they account for 72.114% of the variability in the original data.

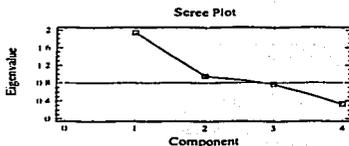


Table of Component Weights

	Component 1	Component 2
Sco2	0.518805	0.174262
Scbm	-0.64343	-0.0585777
Sfas5	-0.243461	0.960607
Sfas11	-0.50751	-0.208414

The StatAdvisor

This table shows the equations of the principal components. For example, the first principal component has the equation

$$0.518805 \cdot \text{Sco2} - 0.64343 \cdot \text{Scbm} - 0.243461 \cdot \text{Sfas5} - 0.50751 \cdot \text{Sfas11}$$

where the values of the variables in the equation are standardized by subtracting their means and dividing by their standard deviations.

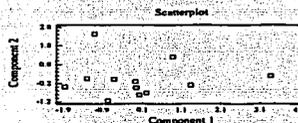
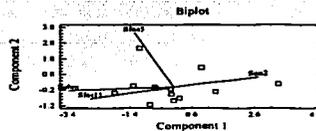
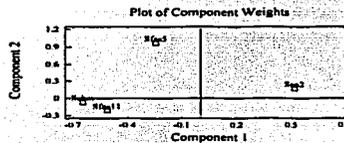


Table of Principal Components

Row	Component 1	Component 2
1	-1.88987	-0.39161
2	-1.29459	0.057648
3	0.203559	-0.712032
4	0.0102233	-0.839279
5	-0.754472	-1.12534
6	3.35239	0.18462
7	1.33898	-0.304143
8	-0.0675809	-0.449478
9	-0.601612	0.0166317
10	-0.082192	-0.114225
11	-1.0986	2.44768
12	0.883762	1.22953

The StatAdvisor

This table shows the values of the principal components for each row of your data file. Select Component Weights from the list of Tabular Options to obtain the equations for each component. Select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options to plot this data. You may save the components by pressing the fourth button from the left on the analysis toolbar.



Análisis de cluster

Data variables:

Sco2

Scbm

Sfas5

Sfas11

Number of complete cases: 12

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)

Distance Metric: Squared Euclidean

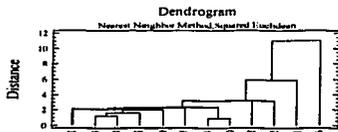
Cluster	Members	Percent
1	12	100.00

Centroids

Cluster	Sco2	Scbm	Sfas5	Sfas11
1	7.28583	188.888	0.0318333	0.0149167

The StatAdvisor

This procedure has created 1 cluster from the 12 observations supplied. The clusters are groups of observations with similar characteristics. To form the clusters, the procedure began with each observation in a separate group. It then combined the two observations which were closest together to form a new group. After recomputing the distance between the groups, the two groups then closest together were combined. This process was repeated until only 1 group remained. To specify the number of final clusters, press the alternate mouse button and select Analysis Options. To determine a reasonable value for the number of clusters, look at the Agglomeration Distance Plot available from the list of Graphical Options.



Membership Table

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)

Distance Metric: Squared Euclidean

Row	Cluster
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1

TESIS CON
 FALLA DE URGEN

The StatAdvisor

This table shows which cluster each observation belongs to. To plot these results, select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options.

Agglomeration Schedule

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)
Distance Metric: Squared Euclidean

Stage	Clusters Combined		Coefficient	Stage First Appears		Next Stage
	Cluster 1	Cluster 2		Cluster 1	Cluster 2	
1	4	10	0.857284	0	0	7
2	3	8	1.22613	0	0	3
3	3	5	1.63921	2	0	4
4	3	9	2.0044	3	0	5
5	1	3	2.13853	0	4	6
6	1	7	2.29424	5	0	7
7	1	4	2.33438	6	1	8
8	1	2	3.1732	7	0	9
9	1	12	3.18287	8	0	10
10	1	11	5.88888	9	0	11
11	1	6	11.0888	10	0	0

Cluster Number	Smallest Row
1	1

The StatAdvisor

The agglomeration schedule shows which observations were combined at each stage of the clustering process. For example, in the first stage, observation 4 was combined with observation 10. The distance between the groups when combined was 0.857284. It also shows that the next stage at which this combined group was further combined with another cluster was stage 7.