



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**INSTITUTO DE CIENCIAS**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**



*"La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra"*

**CALIDAD DEL CARBONO SECUESTRADO EN SUELOS  
DE LOS SISTEMAS FORESTALES DE LA ZONA DEL  
VOLCÁN LA MALINCHE, ESTADO DE PUEBLA**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta

**ARGELIA RÍOS POSADA**

Asesor de tesis:

M. en C. Miguel Ángel Valera Pérez

Septiembre 2014



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**INSTITUTO DE CIENCIAS**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**



*"La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra"*

# **CALIDAD DEL CARBONO SECUESTRADO EN SUELOS DE LOS SISTEMAS FORESTALES DE LA ZONA DEL VOLCÁN LA MALINCHE, ESTADO DE PUEBLA**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta

**ARGELIA RÍOS POSADA**

Comité tutorial:

Asesor y Tutor	M.C. Miguel Ángel Valera Pérez
Integrante Comité Tutorial	Dra. Gladys Linares Fleites
Integrante Comité Tutorial	M.C. José Adrián Saldaña Munive
Integrante Comité Tutorial	M.C. José Antonio Ticante Roldán



## ÍNDICE GENERAL

Índice general	Pág.
Índice de cuadros	iv
Índice de figuras	vi
	viii

### CONTENIDO

i.	Introducción	1
ii.	Planteamiento del problema	3
iii.	Delimitaciones espacial, temporal y semántica	3
	iii.1 Delimitación espacial	3
	iii.2 Delimitación temporal	3
	iii.3 Delimitación semántica	4
iv.	Preguntas de investigación	6
v.	Justificación	7
vi.	Objetivos	7
vii.	Hipótesis	8

### CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

I.1	Cambio climático	9
I.2	Efecto invernadero	10
I.3	Gases de efecto invernadero (GEI)	13
I.4	Ciclo del carbono en la naturaleza	17
	I.4.1 Ciclo del carbono geológico	19
	I.4.2 Ciclo del carbono biológico	19
I.5	Suelos forestales	20
I.6	Secuestro de carbono en los sistemas forestales	21
	I.6.1 La materia orgánica de los suelos forestales	23
I.7	Materia orgánica del suelo (MOS) y sustancias húmicas	23
I.8	Sustancias húmicas de los suelos y calidad de carbono secuestrado	25
	I.8.1 Sustancias húmicas del suelo	26
	I.8.2 Ácidos fúlvicos	26
	I.8.3 Ácidos húmicos	27
	I.8.4 Huminas	27
	I.8.5 Clasificación de ácidos húmicos	28
I.9	Secuestro de carbono y calidad del carbono secuestrado	29

### CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

### CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

III.1	Localización geográfica	37
III.2	Aspectos físicos	38
	III.2.1 Orografía	38
	III.2.2 Geología	39
	III.2.3 Hidrografía	39
	III.2.4 Clima	40

III.2.5	Suelos	40
III.2.6	Flora	43
III.2.7	Fauna	45
III.3	Aspectos socioeconómicos	45
III.3.1	Demografía	45
III.3.2	Actividad económica	46
	CAPÍTULO IV: MATERIAL Y MÉTODOS	50
IV.1	Delimitación de la zona de estudio y sus microcuencas hidrográficas	50
IV.2	Análisis del cambio en los ciclos hidrológico y microclimático	50
IV.2.1	Elaboración de climogramas para determinar regímenes de humedad del suelo	51
IV.3	Estimación del área deforestada	52
IV.4	Diseño de muestreo y obtención de las muestras de suelo	53
IV.4.1	Preparación de las muestras	55
IV.5	Caracterización física y química de las muestras de suelo	55
IV.5.1	Densidad aparente	56
IV.5.2	Contenido de humedad	56
IV.5.3	Textura del suelo	56
IV.5.4	Color del suelo	56
IV.5.5	pH y delta pH	57
IV.5.6	pH en NaF 1:50 (peso : volumen)	57
IV.5.7	Capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables	57
IV.5.8	Porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico	57
IV.5.9	Porcentaje de nitrógeno total	58
IV.5.10	Relación carbono-nitrógeno	58
IV.6	Extracción y caracterización de los ácidos húmicos del suelo	58
IV.6.1	Extracción y fraccionamiento de las sustancias húmicas del suelo	58
IV.6.2	Determinación de las propiedades ópticas de los ácidos húmicos	59
IV.6.3	Umbral de coagulación de los ácidos húmicos	59
IV.7	Aplicación de las pruebas de hipótesis	59
	CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
V.1.	Delimitación de la zona de estudio y sus microcuencas hidrográficas	61
V.2.	Análisis del cambio en los ciclos hidrológico y micro-climático	62
V.3.	Evaluación de la deforestación en la zona de estudio	73
V.4.	Diseño y localización de los puntos de muestreo	74
V.5.	Propiedades físicas y químicas de los suelos	78
	CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
Referencias		140

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro V.1. Variación de la temperatura media en la región de La Malinche durante los periodos 1985-1995 y 1995-2005	66
Cuadro V.2. Variación de la precipitación media en la región de La Malinche para los periodos 1985-1995 y 1995-2005	67
Cuadro V.3. Claves utilizadas para nombrar a los suelos de la región estudiada	78
Cuadro V.4. Propiedades físicas de los sitios estudiados de la Malinche, deforestados antes de 1986 (MAL)	81
Cuadro V.5. Propiedades físicas de los sitios estudiados de la Malinche cuya deforestación ocurrió entre 1986-2002 (8MAL)	82
Cuadro V.6. Propiedades físicas de los sitios estudiados de La Malinche que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación forestal (0MAL)	83
Cuadro V.7. Propiedades químicas de los sitios estudiados de la Malinche, deforestados antes de 1986 (MAL)	84
Cuadro V.8. Propiedades químicas de los sitios estudiados de la Malinche cuya deforestación ocurrió entre 1986-2002 (8MAL)	85
Cuadro V.9. Propiedades químicas de los sitios estudiados de La Malinche que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación forestal (0MAL)	86
Cuadro V.10. Comparación entre las densidades aparentes de los suelos	87
Cuadro V.11. ANOVA de una entrada de densidad aparente	89
Cuadro V.12. Estadísticos descriptivos de densidad aparente	89
Cuadro V.13. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % de densidad aparente	89
Cuadro V.14. Comparación entre los porcentajes de humedad de los suelos	91
Cuadro V.15. ANOVA de una entrada del porcentaje de humedad	92
Cuadro V.16. Estadísticos descriptivos del porcentaje de humedad	93
Cuadro V.17. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % del porcentaje de humedad	93
Cuadro V.18. Comparación del pH medido en agua (relación 1:2) de los suelos estudiados	94
Cuadro V.19. Clasificación de los suelos en función del pH (suelo:agua relación 1:2)	95
Cuadro V.20. ANOVA de una entrada del pH medido en agua	96
Cuadro V.21. Estadísticos descriptivos del pH medido en agua	97
Cuadro V.22. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % del pH medido en agua	97
Cuadro V.23. Comparación del pH medido en KCl (relación 1:2) de los suelos	99
Cuadro V.24. ANOVA de una entrada del pH medido en KCl	100
Cuadro V.25. Estadísticos descriptivos del pH medido en KCl	100
Cuadro V.26. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % del pH medido en KCl	101
Cuadro V.27. Comparación del delta pH de los suelos	103
Cuadro V.28. ANOVA de una entrada del delta pH	104
Cuadro V.29. Estadísticos descriptivos del delta pH	105
Cuadro V.30. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples	

de Fisher al 95 % del delta pH	105
Cuadro V.31. Comparación de capacidad de intercambio catiónico de los suelos	106
Cuadro V.32. ANOVA de una entrada de capacidad de intercambio catiónico	107
Cuadro V.33. Estadísticos de capacidad de intercambio catiónico.	107
Cuadro V.34. Comparación del porcentaje de materia orgánica de los suelos	109
Cuadro V.35. Clasificación de los suelos originados de materiales volcánicos en función de su contenido de materia orgánica	110
Cuadro V.36. Comparación del porcentaje de carbono orgánico de los suelos	111
Cuadro V.37. ANOVA de una entrada del porcentaje de materia orgánica	112
Cuadro V.38. Estadísticos descriptivos del porcentaje de materia orgánica	113
Cuadro V.39. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % del porcentaje de materia orgánica	113
Cuadro V.40. ANOVA de una entrada del porcentaje de carbono orgánico	114
Cuadro V.41. Estadísticos descriptivos del porcentaje de carbono orgánico	115
Cuadro V.42. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % del porcentaje de carbono orgánico	115
Cuadro V.43. Comparación del porcentaje de nitrógeno total de los suelos	117
Cuadro V.44. ANOVA de una entrada del porcentaje de nitrógeno total	119
Cuadro V.45. Estadísticos descriptivos del porcentaje de nitrógeno total	119
Cuadro V.46. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % del porcentaje de nitrógeno total	119
Cuadro V.47. Comparación de la relación C/N de los suelos	121
Cuadro V.48. ANOVA de una entrada de la relación C/N	124
Cuadro V.49. Estadísticos descriptivos de la relación C/N	124
Cuadro V.50. Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % de la relación C/N	124
Cuadro V.51. Comparación de la relación E4/E6 grado de humificación de los suelos	125
Cuadro V.52. ANOVA de una entrada de la Relación E4/E6 grado de humificación de los suelos	126
Cuadro V. 53. Comparación de la relación E4/E5 índice melánico de los suelos	127
Cuadro V. 54. ANOVA de una entrada de la relación E4/E5 índice melánico de los suelos.	128
Cuadro V.55. Estadísticos de la relación E4/E5 índice melánico de los suelos.	128
Cuadro V.56. Comparación del umbral de coagulación a las 2 horas.	129
Cuadro V.57. ANOVA de una entrada de umbral de coagulación a las 2 horas	130
Cuadro V.58. Estadísticos de umbral de coagulación a las 2 horas	130
Cuadro V.59. Comparación del umbral de coagulación a las 4 horas.	131
Cuadro V.60. ANOVA de una entrada de umbral de coagulación a las 4 horas.	132
Cuadro V.61. Estadísticos de umbral de coagulación a las 4 horas	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura I.1. Aumento de temperatura y CO <sub>2</sub> de 1950 – 2010	12
Figura I.2. Crecimiento medio anual de CO <sub>2</sub> atmosférico, CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O de 1985 – 2010.	15
Figura I.3. El ciclo terrestre del carbono: el carbono del suelo y el carbono global disponible	18
Figura I.4. Compartimentos y flujos globales del carbono	19
Figura I.5. Sustancias húmicas del suelo	27
Figura III.1. Localización geográfica de la zona de estudio	37
Figura III.2. División municipal de la zona de estudio	38
Figura III.3. Suelos predominantes en La Malinche, estado de Puebla	41
Figura IV.1. Grid trazado para la localización de los puntos de muestreo.	54
Figura V.1. Microcuencas identificadas en la zona de estudio	61
Figura V.2. Isotermas del periodo 1985-1995 en la región de La Malinche	63
Figura V.3. Isotermas del periodo 1995-2005 en la región de La Malinche	64
Figura V.4. Isoyetas del periodo 1985-1995 en la región de La Malinche	65
Figura V.5. Isoyetas del periodo 1995-2005 en la región de La Malinche	66
Figura V.6. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en Acajete, Puebla	69
Figura V.7. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada la en la localidad de Concepción Capulac, municipio de Amozoc	69
Figura V.8. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en la localidad de San Miguel Canoa, municipio de Puebla	70
Figura V.9. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica México 68 (municipio de Puebla)	70
Figura V.10. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada el municipio de Huamantla	71
Figura V.11. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en el municipio de Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos	71
Figura V.12. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en el municipio de San Luís Teolocho	72
Figura V.13. Climogramas generales obtenidos para la región de La Malinche	72
Figura V.14. Área deforestada en el periodo 1986-2002, La Malinche, estado de Puebla	73
Figura V.15. Localización del área de muestreo	74
Figura V.16. Puntos programados del muestreo	75
Figura V.17. Puntos de muestreo realizados	76
Figura V.18. Puntos de muestreo y unidades de suelo	77
Figura V.19. Cambio espacial de la densidad aparente de los suelos	88



Figura V.20. Gráfico descriptivo de las medias de densidad aparente para los diferentes bloques de estudio	90
Figura V.21. Cambio espacial del % de humedad de los suelos.	92
Figura V.22. Gráfico descriptivo de las medias del porcentaje de humedad para los diferentes bloques de estudio	94
Figura V.23. Cambio espacial de la acidez hidrolítica de los suelos	96
Figura V.24. Gráfico descriptivo de las medias del pH medido en agua (relación 1:2) para los diferentes bloques de estudio	98
Figura V.25. Cambio espacial de la acidez intercambiable de los suelos	99
Figura V.26. Gráfico descriptivo de las medias del pH medido en KCl (relación 1:2) para los diferentes bloques de estudio	101
Figura V.27. Cambio espacial del delta pH de los suelos	104
Figura V.28. Gráfico descriptivo de las medias del delta pH para los diferentes bloques de estudio	106
Figura V.29. Cambio espacial de la capacidad de intercambio catiónico de los suelos	108
Figura V.30. Gráfico descriptivo de las medias de capacidad de intercambio catiónico para los diferentes bloques de estudio	108
Figura V.31. Cambio espacial del % de Carbono Orgánico de los suelos.	112
Figura V.32. Gráfico descriptivo de las medias del porcentaje de materia orgánica para los diferentes bloques de estudio	114
Figura V.33. Gráfico descriptivo de las medias del porcentaje de carbono orgánico para los diferentes bloques de estudio	116
Figura V.34. Cambio espacial del % de nitrógeno total de los suelos.	118
Figura V.35. Gráfico descriptivo de las medias del porcentaje de nitrógeno total para los diferentes bloques de estudio	120
Figura V.36. Cambio espacial del % de nitrógeno total de los suelos	123
Figura V.37. Gráfico descriptivo de las medias de la relación C/N para los diferentes bloques de estudio	125
Figura V.38. Gráfico descriptivo de las medias de la Relación E4/E6 Grado de Humificación para los diferentes bloques de estudio	126
Figura V.39. Gráfico descriptivo de las medias de la Relación E4/E5 Índice Melánico para los diferentes bloques de estudio	129
Figura V.40. Gráfico descriptivo de las medias del umbral de coagulación a las 2 horas para los diferentes bloques de estudio	131
Figura V.41. Gráfico descriptivo de las medias del umbral de coagulación a las 4 horas para los diferentes bloques de estudio	133

## **i. INTRODUCCIÓN**

La atmósfera terrestre tiene la capacidad de absorber y re-emitir radiación infrarroja gracias a la presencia de los gases de efecto invernadero; sin ellos, el planeta tendría una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ ; y no hay duda de que la vida, como la conocemos, no existiría. El problema actual con los gases de efecto invernadero radica en que la mayoría de los modelos climatológicos sugieren que el aumento en la concentración de ellos contribuye a una mayor variación en el clima (Magaña, 2004).

Debido principalmente a las actividades humanas, se han generado altas concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), como lo son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), los clorofluorocarbonos (CFC's), entre otros, los cuales contribuyen directamente al calentamiento atmosférico global. Se ha señalado que las concentraciones de estos gases han aumentado 3.5 veces en los últimos 50 años, y que la cantidad de los mismos en la atmósfera se ve incrementada como consecuencia del cambio de uso de suelo entre otros factores (Loa, *et al.*, 1996).

El  $\text{CO}_2$  es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera; representa el 60% de la concentración total de todos los gases de este tipo y su tasa de crecimiento anual es la más alta de todos (NOAA, 2013). Su concentración pasó de 280 ppm, a mediados del siglo XVIII, hasta 389 ppm en la actualidad. Esto afecta de manera importante a los ciclos biogeoquímicos, particularmente el Ciclo del Carbono, ya que debido a las altas emisiones de  $\text{CO}_2$  provocadas por la quema de combustibles, se tiene como consecuencia que las fuentes del mismo excedan sus sumideros. El suelo juega un papel fundamental en este ciclo e influye en las concentraciones de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera.

La presencia de los bosques son sustento para la vida de muchas especies que existen en ellos, también evitan la erosión y degradación de los suelos, y sirven como sumideros de contaminantes ambientales tanto de origen natural como antropogénico (Martínez y Fernández, 2004).

En México, la segunda fuente de emisión de gases de efecto invernadero es el sector “uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura” (Velázquez *et al.*, 2002). Ochenta y nueve por ciento de las emisiones por este rubro corresponden sólo al  $\text{CO}_2$ , que proviene de la combustión y descomposición de biomasa asociada a los procesos de conversión de bosques a otros usos; de emisiones derivadas de los suelos minerales y áreas agrícolas y por la emisión de bosques manejados.

Por ello se buscan alternativas para reducir las concentraciones de gases que incrementen el calentamiento global, entre las que se puede señalar al secuestro de carbono.

El secuestro de carbono es el proceso por el cual el CO<sub>2</sub> de la atmósfera se incorpora en formas almacenadas en el suelo y la biomasa, quedando temporalmente inmovilizado respecto a la circulación biogeoquímica durante largos periodos de tiempo. Ciertas estimaciones sugieren que el conjunto de suelos del planeta constituyen la principal reserva de carbono (C), acumulando probablemente de 1,500 a 2,000 Pg (Pg=petagramo = 10<sup>15</sup> g = mil billones de gramos) (Almendros, 2001).

Los especialistas en ciencias de la atmósfera observan que la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico tiende a bajar por arriba de los 55° de latitud N, esto se relaciona con el secuestro del CO<sub>2</sub> por el suelo y las plantas en esas latitudes. En general, se estima que más de 1.8 Tg C, año<sup>-1</sup> (1Tg = teragramo = 10<sup>12</sup> g) son secuestrados por los sistemas suelo: planta (Houghton *et al.*, 1998; citado por Swift, 2001).

Siendo los suelos un sumidero fundamental para la Captura de Carbono, también puede transformarse en fuente de emisión de CO<sub>2</sub> por la mineralización del humus, que es la parte orgánica del suelo resultante de la descomposición parcial de materias animales y vegetales, por lo que una forma de estimar la estabilidad del humus del suelo es establecer el grado de humificación alcanzado. Es tan importante cuantificar el carbono orgánico del suelo igual que el hacer un análisis cualitativo de la estabilidad de los compuestos que contienen a este carbono orgánico (Valera *et al.*, 2005).

La evaluación del secuestro de carbono se encuentra muy limitada debido a que sólo se ha dado importancia al problema cuantitativo y no se conocen, aunque fuese de manera parcial, los mecanismos de formación y transformación de la materia orgánica en los suelos, aspecto relacionado con la calidad del carbono secuestrado. Esta situación se hace especialmente patente en el caso de las sustancias húmicas (SH), que consisten en macromoléculas complejas, diferentes a los constituyentes de la biomasa (Stevenson, 1994).

Es por ello que en este proyecto se pretende analizar la calidad del carbono secuestrado en suelos forestales desarrollados en climas templados.

## **ii. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La región ocupada por vegetación forestal del Parque Nacional Malinche, en su porción correspondiente al estado de Puebla, ha sufrido una importante disminución en extensión a partir de 1950 (a pesar de ser un Área Natural Protegida), especialmente después de 1985, como consecuencia del aumento de la población de la ciudad de Puebla y municipios aledaños ocasionado por la desordenada migración de habitantes de la ciudad de México después del macro-sismo del 19 de septiembre. La deforestación del Parque Nacional Malinche ha ocasionado además diferentes procesos de degradación ambiental en la región, cuyas consecuencias se han traducido en la erosión de los suelos, cambio del ciclo hidrológico y micro-climático e importantes emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por la degradación biológica del suelo y pérdida de vegetación forestal (Llaguno, 2007).

Promoviendo el incremento del carbono orgánico del suelo, los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico a escala global pueden disminuir a través del secuestro de carbono.

Los suelos forestales son importantes durante este proceso, ya que son uno de los principales ecosistemas en donde puede secuestrarse mayor cantidad de carbono, y de esta manera contribuir a la disminución del calentamiento global. Sin embargo, no es solamente la cantidad de carbono lo que interesa, sino también, la calidad de carbono que es secuestrado por el suelo, ya que dependiendo de éste factor, podrá retenerse en el suelo el mayor tiempo posible.

## **iii. DELIMITACIONES ESPACIAL, TEMPORAL Y SEMÁNTICA.**

**iii.1. Delimitación espacial:** El estudio se efectuó en la porción del Parque Nacional Malinche perteneciente al estado de Puebla.

**iii.2. Delimitación temporal:** El establecimiento de la delimitación temporal del proyecto consideró tres factores: el bosque de origen, el uso del suelo y el tiempo transcurrido desde que se cambió el uso del suelo. En la región, por las fechas de las imágenes satélite y fotografías aéreas con las que se cuenta significa más de 30 años (entre 1980 y 2002, y la situación actual del bosque).

### iii.3. Delimitación semántica:

- **Ácidos fúlvicos:** material orgánico de color amarillo a ocre, que permanece en solución al acidificar el extracto alcalino de las sustancias húmicas (Stevenson, 1982).
- **Ácidos húmicos:** material orgánico de color oscuro, se extrae del suelo por los reactivos alcalinos (Stevenson, 1982).
- **Andosoles:** suelos desarrollados en cenizas volcánicas y otros materiales piroclásticos, con un complejo de intercambio que es dominado por compuestos húmicos y minerales de rango corto de aluminio y en ocasiones de hierro; o una matriz dominada por vidrio volcánico (IUSS Working Group WRB, 2006).
- **Áreas Naturales Protegidas:** son porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, en donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado y que producen beneficios ecológicos cada vez más reconocidos y valorados. Se crean mediante un decreto presidencial y las actividades que pueden llevarse a cabo en ellas se establecen de acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, su reglamento, el programa de manejo y los programas de ordenamiento ecológico. Están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo, según categorías establecidas en la Ley (CONAP, 2013).
- **Bosque:** todo ecosistema que tiene como mínimo un 10% de copa formada por árboles o bambúes, generalmente asociada a flora y fauna silvestres y a condiciones naturales del suelo donde no se practican actividades agrícolas (FAO, 2011).
- **Calentamiento global:** fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas; como también es una teoría que predice, a partir de proyecciones basadas en simulaciones computacionales, un crecimiento futuro de las temperaturas (Magaña, 2004).
- **Cambio climático:** modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional. En teoría, son debidos tanto a causas naturales (Crowley y North, 1988) como antropogénicas (Oreskes, 2004). El término suele usarse de forma poco apropiada, para hacer referencia tan sólo a los cambios climáticos que suceden en el presente, utilizándolo como sinónimo de calentamiento global.
- **Ciclo del carbono:** es un ciclo biogeoquímico consistente en la sucesión de transformaciones que sufre el carbono a lo largo del tiempo (Jaramillo, 2004).

- **Degradación biológica del suelo:** procesos que aumentan la velocidad de mineralización de humus, teniendo como consecuencia la virtual pérdida del humus del suelo (FAO, 1980).
- **Degradación de suelos:** es el proceso que disminuye la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios (FAO, 1980).
- **Efecto invernadero:** el nombre proviene de su similitud con las instalaciones construidas para cultivar plantas en un ambiente más cálido que el exterior. Resulta de que el aire es un filtro que deja pasar los rayos solares; unos de ellos son absorbidos por la superficie terrestre y por los demás componentes de la Tierra, que se calientan en consecuencia y entonces emite la radiación terrestre en forma de calor, que es absorbida y re-emitida a la superficie de la Tierra (Garduño, 2004).
- **Gases efecto invernadero (GEI):** componentes gaseosos de la atmósfera, tanto de origen natural como antropogénicos, que absorben y re-emiten radiación infrarroja (Cuateconzi y Gasca, 2004).
- **Grid:** es un archivo de formato RASTER o REJILLA que usan los SIG como el ARCGIS o ARCVIEW, esto es, son matrices de datos en donde se tiene en cada celda un atributo numérico (en nuestro caso coordenadas UTM), que puede estar asociado o no a un cuadro.
- **Huminas:** fracción de la materia orgánica del suelo o del humus insoluble en los reactivos alcalinos (Stevenson, 1982).
- **Materia orgánica del suelo (MOS):** es una mezcla de residuos de plantas, de animales y de sustancias húmicas sintetizadas por vía química y biológica, así como de la ruptura de estos materiales, de los productos metabólicos y de los residuos de descomposición de microorganismos y de la fauna del suelo. (García-Calderón, 2001).
- **Materiales piroclásticos:** corresponde a roca pulverizada y fragmentos de lava expulsados desde la chimenea de un volcán. Se clasifican, de menor a mayor tamaño, en cenizas, pumitas, lapillis, bloques y bombas (Educarchile, 2013).
- **Melanización:** es el proceso responsable de la coloración oscura, más o menos negra, que adquieren los horizontes A de los suelos. Es el resultado de la impregnación de los restos orgánicos en la masa del suelo (Porta *et al.*, 2003).

- **Suelo:** el suelo es un cuerpo natural, no consolidado, compuesto por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, que se caracteriza por tener horizontes o capas diferenciales, resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo, y cuyo espesor puede ir desde la superficie terrestre hasta varios metros de profundidad (Sposito, 2008).
- **Suelos de carga variable:** suelos que se caracterizan porque su carga superficial varía ampliamente, tanto en magnitud como en signo, con los cambios en el pH, fuerza iónica y composición de la solución del suelo (Sposito, 2005).
- **Suelos forestales:** suelo que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal o bosque (Pritchett, 1986).
- **Sustancias húmicas:** sustancias de alto peso molecular (hasta 300,000), de color negro, pardo a amarillento, formadas por reacciones de síntesis secundaria; este término se utiliza como el nombre genérico que describe al material coloreado o a sus fracciones obtenidas con base a sus características de solubilidad; éstos materiales son distintivos del medio edáfico (o sedimento), donde son diferentes a los biopolímeros de los microorganismos y de las plantas superiores (incluyendo la lignina) (Stevenson, 1982).
- **Uso del suelo:** el concepto de uso del suelo está ligado a los intereses humanos sobre éste recurso natural, los cambios en las clases de uso e intensidad de la utilización del suelo son una parte de la historia de la civilización (Millar *et al.*, 1980).
- **Parque nacional:** área natural protegida que está constituida por uno o más ecosistemas que se signifique por su belleza escénica, su valor científico, educativo, de recreo, de su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o bien por otras razones análogas de interés general (Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 2003).

#### iv. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN:

- ¿De qué calidad es el carbono secuestrado en los suelos forestales de la región estudiada?
- ¿Contribuye de manera significativa el cambio de uso de suelo y la deforestación en la calidad del carbono secuestrado?

## **v. JUSTIFICACIÓN.**

Los bosques y suelos localizados en el Parque Nacional Malinche son considerados recursos naturales importantes debido a que sirven de área de recarga de los acuíferos que proporcionan parte del agua de uso potable e industrial para la ciudad de Puebla y municipios aledaños.

Uno de los mayores problemas a los que se ha enfrentado esta región, es la deforestación ocasionada durante los últimos 25 años, y debido a ello se ha generado la degradación biológica de los suelos, provocando un incremento en las cantidades de CO<sub>2</sub> emitidas al medio ambiente.

De acuerdo a estudios realizados con respecto a la cantidad de carbono secuestrado en suelos de uso forestal y agrícola en el Parque Nacional Malinche, se ha encontrado que existen altas cantidades del mismo en ciertas zonas. Sin embargo, no existe información sobre la calidad de este carbono secuestrado, ni de cómo cambia esta calidad en los diferentes sistemas forestales de la región, por lo que el propósito de este proyecto es analizar los componentes humificados de la materia orgánica de los suelos con el fin de conocer la calidad del carbono que han secuestrado.

Los resultados de este proyecto serán de inapreciable importancia en el establecimiento de estrategias y programas de reforestación y restauración ecológica tendientes a solucionar los problemas.

## **vi. OBJETIVOS:**

- Determinar la calidad del carbono secuestrado en los suelos forestales de la región del Parque Nacional Malinche del estado de Puebla.
- Determinar la calidad de carbono secuestrado en cada una de las áreas deforestadas en diferente periodo y compararla con la de las áreas que conservan vegetación forestal.



## **vii. HIPÓTESIS:**

Primer juego de hipótesis:

- $H_1$ : La calidad del carbono secuestrado en los suelos forestales de la región estudiada corresponde a la de ácidos húmicos con poca melanización y baja condensación aromática, de Tipo P en la clasificación de Kumada.
- $H_0$ : La calidad del carbono secuestrado en los suelos forestales de la región estudiada corresponde a la de ácidos húmicos más evolucionados que los de tipo P en la clasificación de Kumada.

Segundo juego de hipótesis:

- $H_1$ : Existe diferencia en la calidad del carbono secuestrado en los suelos de uso agrícola y de uso forestal.
- $H_0$ : No existe diferencia en la calidad del carbono secuestrado en los suelos de uso agrícola y de uso forestal.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### I.1. Cambio climático.

El clima es el promedio de muchos parámetros meteorológicos como temperatura, precipitación, presión, vientos, nubosidad y humedad (SEMARNAT-INE, 2006). Cuando uno de estos parámetros, como la precipitación o la temperatura salen de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía o cambio climático ocasionado por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta (aumento en la concentración de gases de efecto invernadero, cambios en el uso de suelo, etc.) (Magaña, 2004). A pesar de que el clima cambia de manera natural, existen claras evidencias de que el calentamiento del planeta registrado en los últimos 50 años puede ser atribuido a los efectos de las actividades humanas (Dirección General de Políticas para el Cambio Climático - SEMARNAT, 2010). Esta alteración del clima de la Tierra ha sido objeto de investigaciones científicas desde hace varias décadas (SEMARNAT - PNUMA, 2006; Martínez y Fernández, 2004). Sin embargo, no fue hasta 1995 cuando en el Panel Internacional sobre Cambio Climático (IPCC), sugirió que las actividades antropogénicas ya habían mostrado una influencia perceptible en muchas variables naturales del clima, y que la temperatura de la superficie terrestre había aumentado aproximadamente 0.6°C en el último siglo. De acuerdo a científicos que han analizado este fenómeno, cada vez tendremos climas más extremos y fenómenos climáticos más intensos. En general, los veranos serán más cálidos y los patrones de las lluvias se modificarán, dando lugar a lluvias más intensas en algunas partes y lluvias menos frecuentes en otras, aumentando así las sequías (SEMARNAT-INE, 2010).

El cambio climático global asociado al aumento potencial de la temperatura superficial del planeta es uno de los problemas ambientales más severos que se presentan el siglo actual. El problema se acentúa por el rápido incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero "GEI" (Bolin, 1986) y por las dificultades de reducir en forma sustantiva el incremento de GEI en el futuro próximo (IPCC, 1995). Estos gases están atrapando una porción creciente de radiación infrarroja terrestre y se ha proyectado que la temperatura superficial global promedio aumentará de 1.4 a 5.8°C de 1990 a 2100. Las proyecciones actuales son mayores a las descritas en el Informe del IPCC de 1995 (1 a 3.5°C), principalmente por una

reducción de las futuras emisiones de bióxido de azufre (las cuales ayudan a enfriar la Tierra). Este calentamiento futuro será además de los 0.6 grados centígrados de aumento desde 1861 (IPCC, 2001). Sin embargo, en un informe dirigido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) el 23 de noviembre de 2010, se explican las probabilidades de mantener el incremento en la temperatura global por debajo de los 2 °C en el siglo XXI, siempre y cuando se cumpla el Acuerdo de Copenhague (PNUMA, 2010). Por "cambio climático" se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático usa el término cambio climático sólo para referirse al cambio por causas humanas. El cambio climático es un problema con características únicas, ya que es de naturaleza global, sus impactos mayores serán en el largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial. Las últimas dos décadas de análisis, discusiones y negociaciones nos muestran con claridad el estrecho vínculo entre cambio climático y desarrollo sustentable (Magaña, 2004).

## **1.2. Efecto Invernadero.**

El efecto invernadero no es una condición nueva en la atmósfera de la Tierra. El nombre *efecto invernadero* proviene de su similitud con las instalaciones construidas para cultivar plantas en un ambiente más cálido que el exterior; dado que el techo de un invernadero tiene la misma propiedad de dejar entrar la radiación solar y bloquear la terrestre generada en su interior. (Garduño, 2004). La capa más baja de la atmósfera, conocida como troposfera, contiene a los gases que son responsables en gran parte de la temperatura del planeta, y por lo tanto, de crear condiciones aptas para la vida (INE-SEMARNAT, 2010).

El efecto invernadero se presenta al existir una atmósfera capaz de absorber radiación infrarroja por medio de gases tales como el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el vapor de agua, el ozono (O<sub>3</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y los clorofluorocarbonos (CFC's) (INE-SEMARNAT, 2010). Estos gases son llamados gases invernadero, pues ellos atrapan el calor del sol en las capas inferiores de la atmósfera. En pequeñas concentraciones, los gases de invernadero son vitales para la supervivencia de los seres vivos. Al retenerse parte de la energía proveniente del sol, permite mantener la temperatura promedio adecuada del planeta

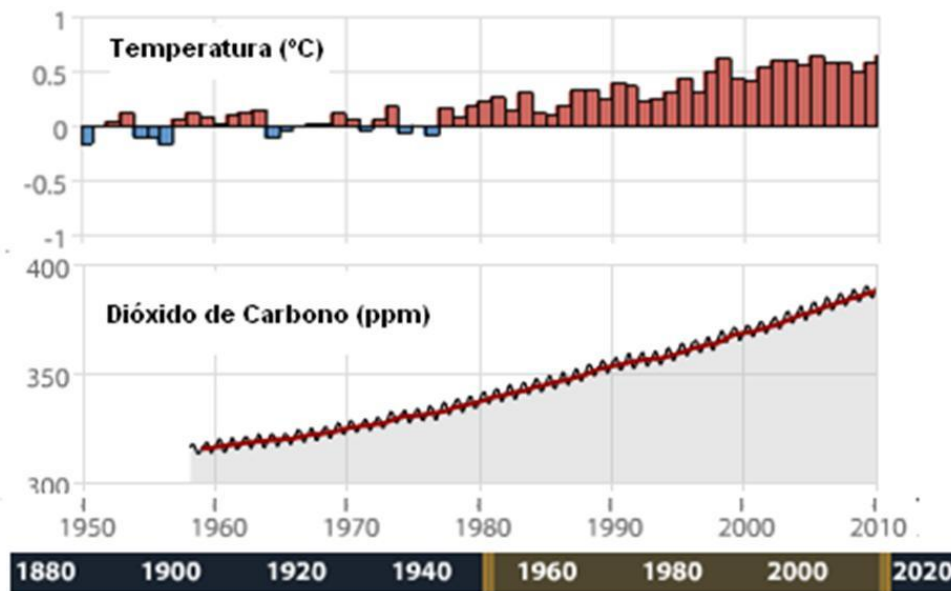
(15°C) y que sea posible la existencia de la vida, tal y como la conocemos. Sin la presencia de una atmósfera la temperatura promedio sería 33°C más baja, -18°C (Garduño, 2004).

La Tierra, al calentarse bajo el influjo de la energía solar que atraviesa su atmósfera, devuelve parte de esta energía al espacio en forma de radiación infrarroja (SEMARNAT-PNUMA, 2006). Sin embargo, este proceso natural entre energía recibida y re-emitida puede verse afectado por el *aumento* en los llamados gases de efecto invernadero (GEI). El aumento de la concentración de los GEI podría re-direccionar más energía infrarroja térmica hacia la superficie y, por tanto, aumentar la temperatura más allá de 15°C. A este fenómeno se le conoce como *efecto invernadero intensificado*, para distinguir su efecto del fenómeno que ha ido operando de forma natural durante milenios (Baird, 2001).

Es claro, si las concentraciones de gases de efecto invernadero continúan aumentando, la temperatura de superficie del planeta mantendrá una tendencia positiva. Aun si las emisiones de estos gases se estabilizan, los efectos del calentamiento perdurarán mucho tiempo, pues los gases de este tipo tienden a permanecer por muchos años en la atmósfera (Magaña, 2004). Se ha detectado que las concentraciones de CO<sub>2</sub> se incrementan año con año. Se estima que este aumento se debe principalmente a las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles, que no se equilibran con los sumideros de CO<sub>2</sub>. Es decir, se emiten del orden de 6000 millones de toneladas de carbono por año (una tonelada de Carbono equivale a 3,666 toneladas de CO<sub>2</sub>), de las cuales alrededor de 3000 millones permanecen y se acumulan en la atmósfera (INE-SEMARNAT, 2010). El potencial de calentamiento atmosférico expresa la importancia relativa de los gases de invernadero con relación al CO<sub>2</sub> en un horizonte de tiempo determinado. Esto es así, pues los gases permanecen en la atmósfera tiempos diferentes, por lo que el potencial de calentamiento es función de cuán eficiente es el gas para absorber radiación infrarroja y cuánto tiempo permanece en la atmósfera. Por ejemplo, en un horizonte de tiempo de 20 años, el metano puede retener 62 veces más radiación infrarroja que el CO<sub>2</sub> (INE-SEMARNAT, 2010). La consecuencia inmediata de la acumulación excesiva de gases de efecto invernadero, es el sobrecalentamiento del planeta. De no frenarse la emisión de estos gases, a largo plazo se prevé la fusión de las capas de hielo en los polos terrestres, lo que ocasionaría una elevación en el nivel de las aguas de los mares y océanos con la consecuente inundación de las zonas costeras bajas.

La certidumbre en la capacidad de los modelos para realizar proyecciones futuras del clima ha aumentado desde el informe del PICC de 1995. Por ejemplo, ahora se cuenta con mayor número de registros de la temperatura que a la vez son más exactos. La reconstrucción

de los datos climáticos de los últimos 1000 años, así como las estimaciones de la modelación de las variaciones climáticas naturales, sugieren que el aumento de la temperatura observada en los últimos 100 años no es lo usual, originado no sólo por causas naturales. El análisis cuidadoso registros históricos (a partir de 1860) de temperatura y precipitación muestra que a finales del siglo XIX empezó a verificarse un aumento de temperatura tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur, coincidiendo con el aumento de las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>. Este aumento de temperatura alcanzó un máximo al final de los años 30. En las décadas siguientes la temperatura global descendió ligeramente hasta finales de los setentas para después continuar su tendencia ascendente (IPCC, 2001) (Figura I.1).



**Figura I.1:** Aumento de temperatura y Co2 de 1950 – 2010

Fuente (NOAA, 2012)

Los datos del clima mundial de los últimos dos decenios indican que la temperatura del aire de la superficie terrestre ha superado los valores máximos de 1930. La oleada de calor se extendió en los hemisferios septentrional y meridional y ha resultado en un aumento de la temperatura media global de aproximadamente 0.5°C desde mediados del siglo pasado (IPCC, 2007). La década de los años noventa fue la más calurosa, y 1998 el año en el cual se registró la temperatura más alta, desde 1861. Los análisis más recientes de la información de los anillos de crecimiento de los árboles, de corales, de los núcleos de las grandes masas de hielo de los mares y los datos de los registros históricos del Hemisferio Norte, indican que el aumento de la

temperatura en el siglo XX probablemente ha sido el mayor de cualquier siglo de los últimos 1000 años (IPCC, 2001).

En las latitudes medias y altas del hemisferio norte, es muy probable que la cubierta de nieve se haya reducido en cerca de un 10% desde fines de los años sesenta, y la duración anual de la cubierta de hielo en los lagos y ríos se acortó en cerca de dos semanas en el siglo XX. Desde 1750, la concentración atmosférica de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) aumentó en un 31%, de 280 ppm a cerca de 367 ppm en la actualidad. La concentración de CO<sub>2</sub> del presente no había sido excedida en los últimos 420,000 años y probablemente tampoco en los últimos 20 millones de años. Los efectos a corto plazo son: alteraciones en los patrones climatológicos del planeta; modificación significativa de la distribución de la lluvia sobre las tierras continentales; incremento en la frecuencia e intensidad de los huracanes en las zonas del Caribe, Océano Índico y el Pacífico sudoriental, así como la inevitable sequía y devastación en innumerables regiones del globo terráqueo.

Se prevé el incremento en la concentración de vapor de agua global promedio y de la precipitación. Se espera que las precipitaciones sean más intensas probablemente sobre áreas del hemisferio norte en latitudes media y alta; sin embargo la intensidad y frecuencia observada de ciclones tropicales y extra-tropicales y de severas tormentas locales, no muestran tendencias claras de largo plazo, aunque los datos a menudo son escasos e inadecuados. Las proyecciones indican que el nivel de los mares aumentara de 0.09 a 0.88 metros en el período de 1990 al 2100 (IPCC, 2007). Los indicadores debido a la contaminación atmosférica son alarmantes e indican la necesidad inaplazable de preservar el ambiente y buscar alternativas energéticas no contaminantes.

### **I.3. Gases de Efecto Invernadero (GEI).**

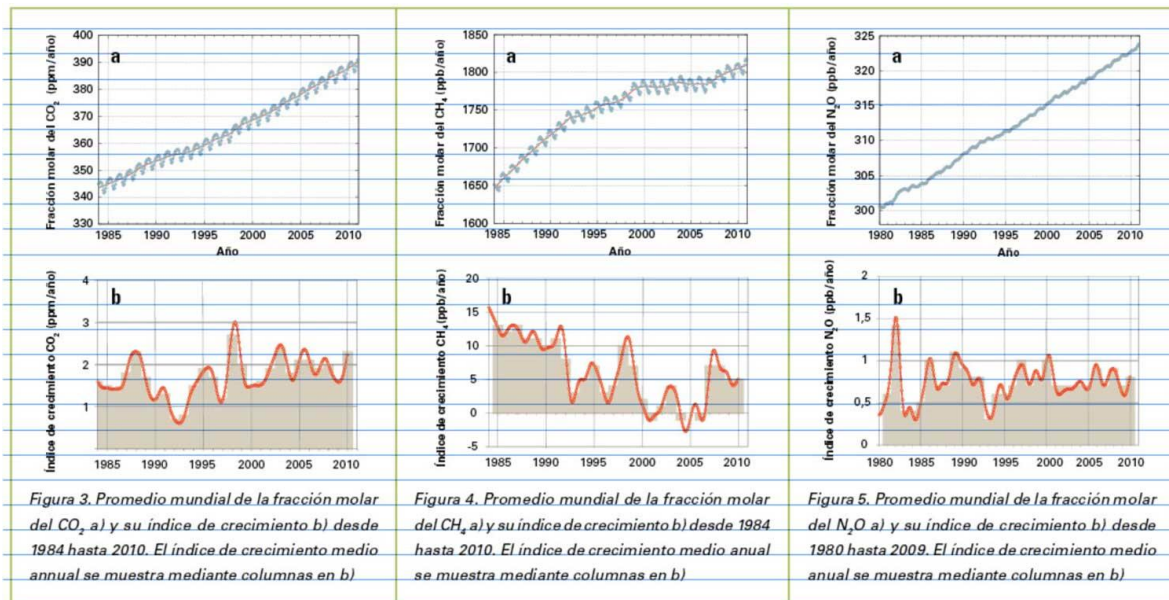
La atmósfera es una mezcla de varios gases y aerosoles (partículas sólidas y líquidas en suspensión). Su composición es sorprendentemente homogénea, resultado de procesos de mezcla que en ella ocurren. El 50% de la masa de la atmósfera está concentrado por debajo de los 5 kilómetros sobre el nivel del mar y donde predominan dos gases: el Nitrógeno y el Oxígeno (Garduño, 2004). De manera natural, la atmósfera está compuesta en un 78.1% de nitrógeno, un 20.9% de oxígeno, y el restante 1% por otros gases, entre los que se encuentran el argón, el helio, y algunos gases de efecto invernadero, como el bióxido de carbono (0.035%), el metano (0.00015%), el óxido nitroso (0.0000016%) y el vapor de agua (0.7%) (SEMARNAT-INE, 2010).

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC): "Por gases de efecto invernadero se entiende aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y re-emiten radiación infrarroja" (SEMARNAT-INE, 2010). El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera constituye la causa principal del calentamiento global, que es el primer signo del cambio climático. A medida que las emisiones de GEI aumentan, se incrementan sus concentraciones en la atmósfera, lo que a su vez, causa un efecto invernadero más acentuado.

Los GEI están dentro del 1% de la composición de la atmósfera, y se dividen en gases de efecto directo e indirecto (Ruiz y Cruz, 2004). Los gases de efecto indirecto son aquellos que tienen capacidad para influir en la concentración atmosférica de otros GEI; por ejemplo, el ozono, el cual además de su carácter oxidante en la atmósfera baja, también puede atrapar radiación infrarroja y filtrar la radiación ultravioleta. Los GEI más importantes son el vapor de agua ( $H_2O$ ) y el bióxido de carbono ( $CO_2$ ); los demás gases invernadero (metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), perfluorometano ( $CF_4$ ), perfluoroetano ( $C_2F_6$ ), hidrofluorocarbonos (nombres comerciales: HFC-23, HFC-134a, HFC-152a) y hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ )) se llaman gases traza (GT) por su presencia ínfima en la atmósfera (Hardy *et al.* 1986; citado en Garduño, 2004). Estos gases están regulados por la CMNUCC y por su Protocolo de Kioto. Si bien todos los gases de efecto invernadero (salvo los CFC's) son naturales, en tanto que ya existían en la atmósfera antes de la aparición del ser humano, desde la Revolución Industrial y debido principalmente al uso intensivo de los combustibles fósiles en las actividades industriales y el transporte, se han producido sensibles incrementos en las cantidades de óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono emitidas a la atmósfera, con el agravante de que otros problemas, como la deforestación, han limitado la capacidad regenerativa de la atmósfera para eliminar el  $CO_2$  (IPCC, 2007).

En los últimos trescientos años la cantidad de bióxido de carbono aumentó un 39% de 280 a 389 ppm (OMM, 2011); la de metano, de 0.7 a 1.75 ppm; y la de óxido nitroso, de 0.27 a 0.316 ppm (Figura I.2). Esto significa que, en volumen, ahora el bióxido de carbono es el 0.046% de la atmósfera en lugar del 0.035%; el metano ahora es el 0.00037% en lugar del 0.00015%, y el óxido nitroso es el 0.0000187% en vez del 0.000016% (SEMARNAT-INE, 2010). Aunque estas concentraciones son muy pequeñas comparadas con las del oxígeno o el nitrógeno, el cambio en ellas realmente está afectado al planeta. Entre 1990 y 2010 hubo un aumento del 29% en el forzamiento radiativo (el efecto calentamiento en nuestro sistema

climático) provocado por los gases de efecto invernadero. Entre 2009 y 2010, su abundancia atmosférica aumentó en 2,3 ppm, superior a la media en la década de los noventa (1,5 partes por millón) y en la pasada década (2,0 partes por millón). El bióxido de carbono representó el 80% de este aumento (OMM, 2011). Ello obedece principalmente a las emisiones de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y los cambios del uso del suelo.



**Figura 1.2** Crecimiento medio anual de CO<sub>2</sub> atmosférico, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de 1985 – 2010.  
Fuente: (OMM, 2011)

Existen otros gases que además de destruir la capa de ozono, también tienen la capacidad de retener el calor emitido por la Tierra. Aunque estos gases son mencionados por la Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono y por el Protocolo de Montreal, y no están señalados por el Protocolo de Kioto, también se consideran como gases de efecto invernadero. Los gases son: clorofluorocarbonos (nombres comerciales: CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, etc.), halones (nombres comerciales: Halon-1211, Halon-1301, Halon-2402, Halon-1202); Clorocarbonos: bromuro de metilo (CH<sub>3</sub>Br), tetracloruro de carbono (CCl<sub>4</sub>) metil cloroformo (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) y los hidroc fluorocarbonos (nombres comerciales: HCFC-22, HCFC-141b) (SEMARNAT-INE, 2010). Estos gases tienen diferentes potenciales de retención de calor (Ruiz Suárez, 2004), es decir, algunos tienen una mayor capacidad que otros para detener la radiación de onda larga emitida por la Tierra, a dicha capacidad se le ha llamado Potencial de Calentamiento Global.



Estudios científicos han identificado el potencial de calentamiento global que tienen diversos gases, es decir, la medida en que éstos tienen impactos en el efecto invernadero que provoca el cambio climático (IPCC, 2007). Para establecer este potencial, se utiliza como referencia para el análisis el bióxido de carbono, el gas predominante en el efecto invernadero (SEMARNAT-INE, 2010). Por otro lado, este potencial de calentamiento global considera el tiempo de vida en la atmósfera de los gases que se estudian, y entonces se establece el potencial, contemplando un horizonte de tiempo de 20, 100 y 500 años, considerando los efectos directos o indirectos que pudiese tener un gas determinado en el calentamiento global de la atmósfera. El carácter directo o indirecto de un gas de efecto invernadero se da por el hecho de que influya directamente en ocasionar el fenómeno o porque afecta el tiempo que otros gases permanecen en la atmósfera (SEMARNAT-INE, 2010)

Desde 1750, el metano ( $\text{CH}_4$ ) contribuye en un 18% al aumento general mundial del forzamiento radiativo\* y es el segundo gas de efecto invernadero más importante después del dióxido de carbono. Antes del inicio de la era industrial, la concentración de metano en la atmósfera era de aproximadamente 700 partes por mil millones (número de moléculas del gas por mil millones de moléculas de aire seco). Desde 1750, ha aumentado el 158%, en gran parte debido a actividades tales como la cría de ganado, el cultivo de arroz, la explotación de combustibles fósiles y los vertederos. En la actualidad, el conjunto de actividades humanas representa el 60% de las emisiones de metano, y los recursos naturales, como los humedales, el 40% restante.

Tras un período de relativa estabilización temporal entre 1999 y 2006, el metano presente en la atmósfera ha vuelto a aumentar. Los científicos están investigando las razones de ello, en particular la posible función que cumple el deshielo del permafrost del hemisferio norte, rico en metano, y el incremento de las emisiones de los humedales tropicales.

Desde 1750, el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) contribuye en un 6% al aumento general mundial del forzamiento radiativo. El óxido nitroso se emite a la atmósfera desde fuentes naturales y artificiales, en particular los océanos, la combustión de biomasa, el uso de fertilizantes y distintos procesos industriales. Actualmente, es el tercer gas de efecto invernadero más importante. En 2010, la carga atmosférica de óxido nitroso era 323,2 partes por mil millones, es decir, 20% más que en la era preindustrial. En los últimos diez años, la carga ha aumentado a una media de aproximadamente 0,75 partes por mil millones, principalmente debido al uso de fertilizantes que contienen nitrógeno, en particular el estiércol, lo que ha afectado marcadamente el ciclo global del nitrógeno.

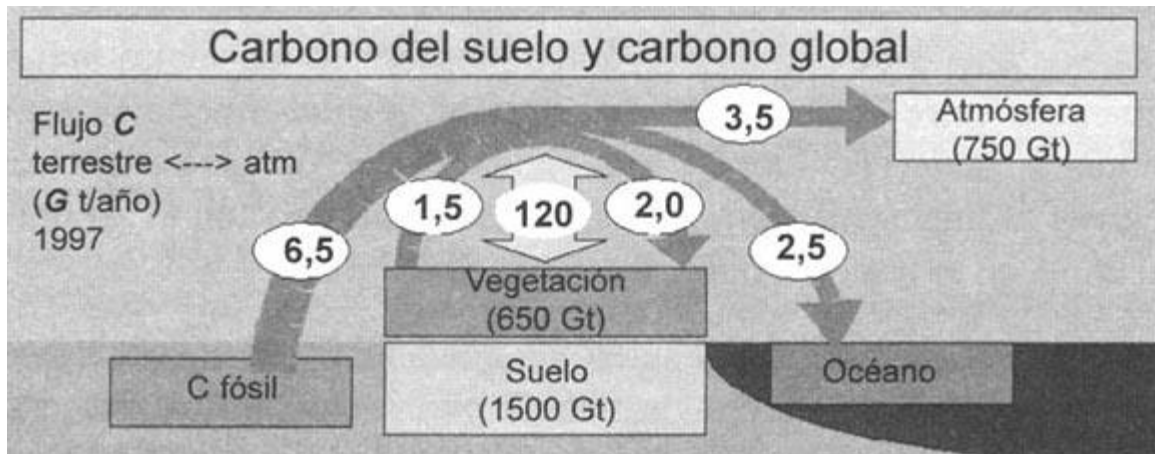
En el transcurso de un período de 100 años, su impacto en el clima es 298 veces mayor a las emisiones equivalentes de dióxido de carbono. Además, cumple también una importante función en la destrucción de la capa de ozono de la estratosfera que nos protege de los rayos solares ultravioletas nocivos. El forzamiento radiativo combinado causado por halocarbonos es del 12%. Algunos de estos halocarbonos, como los clorofluorocarbonos (CFC), que hace unos años se utilizaban como refrigerantes, propulsores de bombas de aerosol y solventes, están disminuyendo poco a poco gracias a las medidas adoptadas a escala internacional para preservar la capa de ozono que protege la Tierra. Sin embargo, las concentraciones de otros gases, como los hidroc fluorocarbonos (HCFC) y los hidro fluorocarbonos (HFC), que se usan como sustitutos de los CFC, están aumentando rápidamente. Estos dos tipos de compuestos son gases de efecto invernadero muy potentes y permanecen mucho más tiempo en la atmósfera que el dióxido de carbono (OMM, 2011).

El cambio climático global antropogénico actual continuará seguramente, dado que seguirán creciendo el CO<sub>2</sub> y los GT, pues sus emisiones son consustanciales al estilo de vida de nuestra civilización, misma que ha comenzado a interesarse y preocuparse del problema y sus repercusiones en los sistemas naturales y artificiales (IPCC, 2001).

#### **I.4. Ciclo del Carbono en la Naturaleza.**

El carbono (C) es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, en los que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno para constituir las moléculas más importantes para la vida. El carbono, en su unión molecular con el oxígeno, constituye el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos, y cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de invernadero (Jaramillo, 2004).

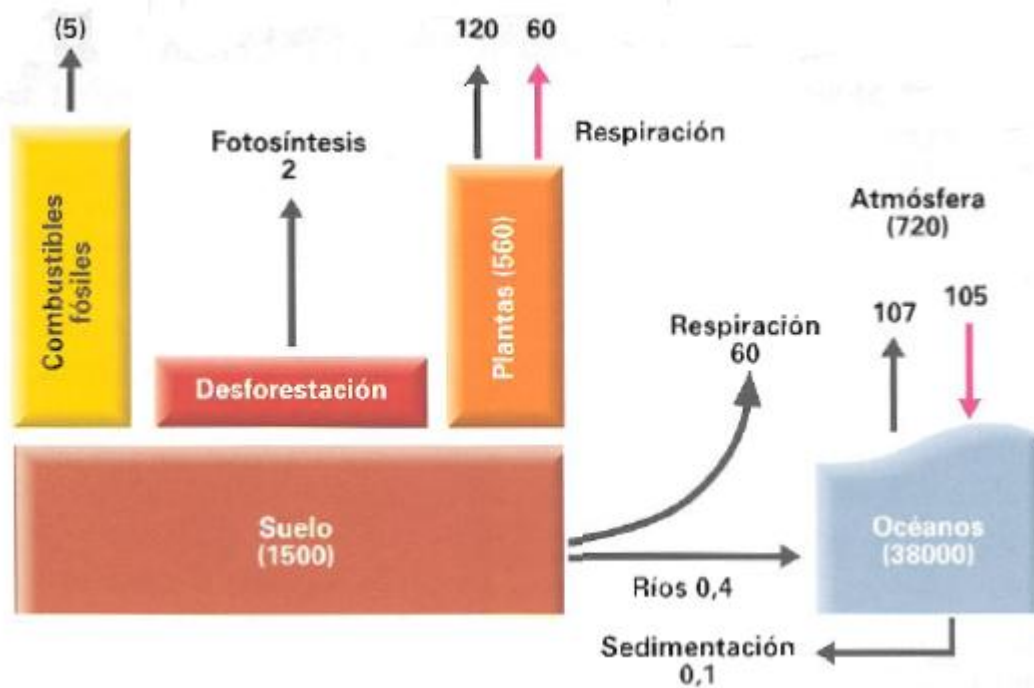
Históricamente se han notado grandes variaciones en las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico. Una mejor apreciación del por qué las concentraciones de CO<sub>2</sub> están incrementándose en la atmósfera puede obtenerse al examinar el ciclo del carbono, ya que el carbono cumple un papel fundamental en los procesos fisicoquímicos y biológicos del planeta.



**Figura I.3.** El ciclo terrestre del carbono: el carbono del suelo y el carbono global disponible. Según *International Geosphere Biosphere Program (1998)*.

El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico que implica diferentes mecanismos para el sostenimiento de la vida (Figura I.3). Los procesos de captura y emisión de carbono son parte de un sistema de cinco reservorios de carbono (las reservas geológicas, los océanos, la atmósfera, los suelos y la biomasa vegetal) (Gallardo, 2007), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes (Figura I.4) y estrechamente interrelacionados (De Petre, 2005). En este ciclo, el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1,500 Pg C a un metro de profundidad (cerca de 2,456 a dos metros de profundidad). El carbono inorgánico representa cerca de 1,700 Pg pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos (FAO, 2002).

Este ciclo comprende dos procesos que suceden a distintas velocidades: el ciclo geoquímico y el ciclo biológico. El ciclo geoquímico funciona en una escala temporal de millones de años, mientras que el ciclo biológico funciona en una escala temporal de días a miles de años (<http://www.ciclodelcarbono.com/>).



**Figura 1.4.** Compartimentos y flujos globales del Carbono (en Pg)  
Schlesinger y Xu, 1991; citado por (Gallardo, 2007).

**1.4.1. Ciclo de carbono geológico.** Desde la formación de la Tierra, las fuerzas geológicas han actuado paulatinamente sobre el ciclo global del carbono. En periodos de larga duración, el ácido carbónico se combina poco a poco con minerales en la superficie de la Tierra, estas reacciones forman carbonatos que posteriormente producto del intemperismo desembocan en el océano donde terminan sedimentándose en el fondo, después por los procesos de subducción, estos sedimentos son empujados bajo los márgenes continentales y por razón de las fuerzas tectónicas las rocas con altas concentraciones de carbono se calientan y eventualmente se funden para volver a la superficie transformando en  $\text{CO}_2$ , de esta manera regresa el carbono a la atmósfera (Jiménez, 2007; citado por Vela, 2009). Como anteriormente se menciono el carbono almacenado circula de manera muy lenta, en escalas de tiempo de millones de años, los factores que gobiernan en esos procesos son de tipo geológico: deriva continental, volcanismo, metamorfismo e intemperismo (Aviña, 2007; citado por Vela, 2009).

**1.4.2. Ciclo de carbono biológico.** El ciclo del carbono se inicia con la fijación del  $\text{CO}_2$  atmosférico a través de organismos fotosintetizadores. Cuando los organismos vegetales se

descomponen, se depositan y se comprimen en el suelo, posteriormente, sufren una serie de cambios químicos para formar turba, luego lignito y finalmente carbón. Estos fenómenos capturan y almacenan carbono, pero las actividades mineras obtienen el carbón y el petróleo que al ser utilizados por la industria los convierten en CO<sub>2</sub> volviendo de esta forma al principio del ciclo. Otra forma de regresar el carbono a la atmósfera es a través de procesos de oxidación tales como la respiración de plantas y animales, la descomposición de los suelos y la quema de la vegetación. La mayor parte del carbono se encuentra en las rocas como carbonatos. Las rocas se erosionan y con el tiempo los carbonatos vuelven al ciclo del carbono (Pérez, 2007; citado por Vela, 2009).

### **I.5. Suelos Forestales.**

El suelo es un recurso natural no renovable debido a que su proceso de formación tarda cientos de años. Es un sistema dinámico que ejerce funciones de soporte biológico en los ecosistemas terrestres; interviene en los ciclos de carbono, azufre, nitrógeno y fósforo como parte fundamental en el equilibrio de los ecosistemas, funciona como filtro y amortiguador que retiene sustancias, protegiendo las aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos, transforma compuestos orgánicos descomponiéndolos o modificando su estructura consiguiendo la mineralización, también proporciona materias primas renovables y no renovables de utilidad para el ser humano (CONAFOR, 2012).

La necesidad de un estudio por separado del suelo forestal y agroforestal se ha puesto en tela de juicio por muchos edafólogos, el argumento es que con excepción de los suelos de tundra, de pantano, de pastizal, de desierto y de origen antropológico, todos los demás suelos han tenido un origen forestal. Si bien esto es estrictamente cierto, también lo es que los suelos que se desarrollan actualmente bajo una cubierta forestal, se encuentran en condiciones micro-climáticas y con un espectro de microorganismos diferentes de los que están presentes en los demás suelos, por lo que muchas de sus propiedades, y sobre todo reacciones y comportamiento, también difieren significativamente de los otros (Pritchett y Fisher, 1987). Procesos tan dinámicos como los ciclos de nutrimentos entre los componentes de los campos forestales, la formación de sustancias húmicas a partir de residuos orgánicos en descomposición y la subsiguiente lixiviación de las bases del suelo, constituyen un carácter distintivo a los suelos con cubierta forestal (Peña *et al.*, 2005).

Los suelos forestales han sido en general poco estudiados en nuestro país, sobre todo con los objetivos de encontrar relaciones cuantitativas entre el suelo y otros factores del ecosistema forestal (CONAFOR, 2012). Por otra parte, muchas zonas que anteriormente se

encontraban cubiertas con vegetación natural, como consecuencia del aumento de la presión demográfica, en la actualidad han sido sometidas a un cambio drástico en el uso del suelo lo que ha originado la pérdida de la vegetación forestal y la consecuente degradación del suelo. Estudios recientes demuestran que 64% de los suelos de México presentan problemas de degradación en diferentes niveles, que van de ligera a extrema. Sólo 26% del territorio nacional cuenta con suelos que mantienen sus actividades productivas sustentables sin degradación aparente (CONAFOR, 2012).

### **I.6. Secuestro de Carbono en los Sistemas forestales**

Los suelos forestales son los mayores depósitos de carbono en los ecosistemas terrestres. Contienen cuatro veces la cantidad de carbono que la vegetación. Sin embargo, su sobreexplotación causa rápida degradación de su materia orgánica, lo que puede guiar a un incremento en la emisión de gases, aumentando el efecto invernadero, estimándose que la reducción del 1% en el nivel de C orgánico contenido en los 15 cm superiores de depósitos en el suelo de los trópicos puede conducir a una emisión anual aproximadamente 128 billones de toneladas de carbono dentro de la atmósfera (Lal y Sánchez, 1992).

Siendo los suelos un sumidero fundamental para la captura de carbono con una cantidad estimada de  $250 \times 10^9$  toneladas por año, también puede transformarse en fuente de emisión de  $\text{CO}_2$  por la mineralización de la materia orgánica.

Estimaciones teóricas del potencial global para la captura de  $\text{CO}_2$  durante los próximos 50 años por vía de medidas agrícolas y forestales varían entre 0.5 y 2.0  $\text{GtC año}^{-1}$  (1  $\text{GtC}$  = Gigatonelada = un billón de toneladas). Las estimaciones del costo de la captura son aun más variables de \$1 a \$50 US por tonelada de carbono. Estas cifras indican que las medidas agroforestales pueden brindar una reducción significativa del costo en el control de las emisiones pero no implican una solución definitiva al problema del calentamiento global.

Las emisiones nacionales del sector urbano/industrial se estiman en  $110 \text{ MtC año}^{-1}$ , (Mega toneladas de Carbono) y México se ubica dentro de los 15 mayores emisores del mundo. Casi  $50 \text{ MtC año}^{-1}$  son emitidas por la deforestación, mientras que la regeneración de bosques secundarios resulta en una captura de  $20 \text{ MtC año}^{-1}$  (Lal y Sánchez, 1992).

Existen varias formas de medir, vigilar y analizar la captura de carbono actual y potencial de los bosques y sistemas agroforestales y existe además la necesidad de desarrollar estrategias y métodos para aumentar la captura de carbono por estos ecosistemas.

El contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera aumenta cada año y, sin duda, seguirá subiendo en el futuro. Los ecologistas forestales conciben bastante bien las consecuencias fisiológicas. La creciente oferta de carbono aumenta el intercambio de Carbono entre la atmósfera y las plantas en un 15% cada año y los bosques aún captan una gran parte de estas emisiones. El carbono en la biosfera terrestre está distribuido entre la atmósfera, la biomasa y el suelo; el 80% del carbono en las plantas se encuentra en los árboles, y los ecosistemas forestales contienen el 40% del carbono terrestre (Jandl, 2001).

Desafortunadamente, solo el 10% de los bosques están ordenados (Dixon *et al.*, 1994). La cantidad de “carbono negro” en el suelo es igual a la suma del Carbono contenido en los bosques y del bióxido de carbono en el aire. En consecuencia, los suelos forestales desempeñan un determinado papel en el ciclo de carbono.

El papel de los bosques como moderador del ciclo biogeoquímico del carbono es mínimo, por lo que la solución óptima sería adoptar medidas para disminuir la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, para los ecologistas, es un reto el definir las opciones que pueden ofrecerse para ayudar en los esfuerzos para mitigar los efectos adversos sobre nuestros recursos naturales. Recientemente, se han originado discusiones acerca de la manera en que los bosques pueden mitigar las consecuencias del cambio del clima, como resultado de la adopción de medidas silviculturales. Los bosques del mundo no tienen la capacidad de almacenar todo el Carbono que se emite, pero tienen el potencial de retenerlo durante algunas décadas, tal y como lo señala Martino (2007), asesor internacional sobre medio ambiente y experto en calentamiento global, cuando asegura que “...*el sector forestal ofrece la opción de comprar tiempo...*”;

El ciclo mundial de carbono se caracteriza por largos y variables flujos naturales entre la atmósfera, los océanos y la vegetación, comparativamente, este almacenamiento temporal es pequeño. En la actualidad, el 30% del carbono emitido, “el carbono desaparecido”, se disipa en los ecosistemas terrestres, pero no se sabe todavía cuánto tiempo se mantiene este secuestro de carbono, o si solamente es un efecto transitorio (Jandl, 2001).

El ciclo de carbono requiere algunas claras definiciones. La productividad primaria bruta (PPB) incluye todo el carbono asimilado. La productividad primaria neta (PPN) es el PPB menos la respiración de las plantas. La productividad neta del ecosistema (PNE) es la PPN menos la respiración del suelo, es decir la respiración de los microbios y las raíces; estos procesos son razonablemente regulares y se pueden predecir. Al final, la productividad neta del bioma (PNB)

disminuye la PNE por pérdidas irregulares no-respiratorias como fuegos o talas (IGBP-TC-WG, 1998).

Si bien los inventarios forestales resultan efectivos para medir la biomasa por encima del suelo, es decir los troncos y el follaje en bosques uniformes, existe incertidumbre acerca de la medición de la biomasa debajo del suelo, esto es las raíces y los microorganismos. Además, a escala mundial, existen opiniones divergentes acerca de la definición de áreas de vocación forestal. Aún cuando existiera consenso en este aspecto, aparecen otras dificultades: un problema serio es que no es posible medir el Carbono del suelo con precisión a causa de la enorme variabilidad espacial. La cuestión que surge en todos los métodos que miden los cambios en depósitos de carbono, es que sean conservadores en caso de incrementos y sensitivos en caso de reducciones (Hamburg, 2000) para evitar el “carbono imaginado”, que no tiene ningún efecto. Los conocimientos actuales sobre los procesos del carbono en el suelo son incompletos hasta ahora. Asimismo, son frecuentemente desconocidos los datos químicos de los suelos a la profundidad de 1 metro (Jandl, 2001).

**I.6.1. La materia orgánica de los suelos forestales.** El control más importante de la cantidad de materia orgánica en el suelo sigue siendo la erosión y la forma del manejo de la tierra; pero también tiene influencia el cambio de la vegetación. El carbono del suelo es un subsistema bastante complicado; hay componentes que son utilizados en horas, como los carbohidratos con energía abundante y partes oxidadas de los cuales los microorganismos no pueden captar casi ninguna energía.

Existen tres opciones de cómo el suelo forestal puede contribuir a la secuestación de Carbono (Hättenschwiler & Körner, 1996):

- crear nuevos sumideros de carbono = aforestería. Que es mejor porque los suelos agrícolas contienen menos carbono que los suelos forestales,
- reducir la tasa de liberación de Carbono. Hay circunstancias cuando el Carbono recicla lentamente, como en suelos ácidos o húmedos o fríos y tiene relación con las características de los compuestos húmicos que se forman y su persistencia en el medio.

### **I.7. Materia Orgánica del Suelo (MOS) y Sustancias Húmicas.**

La materia orgánica del suelo (MOS), aunque no es su componente más abundante, en la mayoría de los suelos, sí es el más importante en todos debido a la gran actividad físico-



química y biológica que genera y que controla en el mismo. La MOS, según Zagal *et al.* (2002), está formada por dos componentes básicos, desde el punto de vista físico: una fracción liviana y una fracción pesada. La fracción liviana se caracteriza por no estar muy firmemente asociada con los minerales del suelo y por ser una materia orgánica poco transformada; posee una relación C/N con valores entre 12 y 39 y una densidad específica  $< 2 \text{ Mg m}^{-3}$ . Constituye hasta el 30% de la MOS (Zagal *et al.*, 2002). La fracción pesada es aquella que se encuentra incorporada en los complejos órgano-minerales del suelo y que está fuertemente transformada. Tiene menor relación C/N y mayor densidad específica que la fracción ligera y constituye entre 30 y 50 % de la MOS (Zaga *et al.*, 2002).

Químicamente, la MOS se compone de una fracción macro-orgánica o de materiales orgánicos frescos y de humus. El componente más importante es el humus, que puede representar hasta el 90 % del carbono total del suelo. A su vez, el humus se ha dividido, convencionalmente, en sustancias no húmicas y en sustancias húmicas (Bendeck, 2003), siendo estas últimas las más importantes en el suelo, debido a sus propiedades características: es un material coloidal, de composición indefinida, oscuro, con alta superficie específica y alta actividad química (CIC). Según su solubilidad se puede fraccionar el humus en 3 grupos de compuestos: ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas.

Según Bendeck (2003), la polimerización o policondensación de compuestos fenólicos produce, en primer lugar, los AF en los que predominan las cadenas alifáticas sobre los núcleos aromáticos. Al seguir aumentando la condensación y la cantidad de núcleos aromáticos y disminuir las cadenas alifáticas, se forman los AH. Un incremento en la condensación de los núcleos aromáticos con un empobrecimiento en cadenas alifáticas y en grupos funcionales, principalmente COOH, conlleva a la formación de la humina.

Los AF difieren de los AH en que son menos condensados, tienen menor tamaño y peso molecular y tienen mayor cantidad de grupos funcionales oxigenados; así mismo son más jóvenes, más reactivos y más móviles (Bendeck, 2003). Los AF son solubles a cualquier pH, se dispersan fácil en agua y tienen mayor acidez y mayor capacidad de complejación que los AH, los que son insolubles en agua y en casi todos los solventes no polares, pero son solubles en soluciones alcalinas. Las huminas son insolubles en cualquier pH.

La MOS se puede caracterizar mediante muchas técnicas, dependiendo de lo que se quiera conocer en específico. De los aspectos más importantes para conocer de la MOS están la cantidad y propiedades de la fracción húmica, así como el grado de humificación que ella tiene, para lo cual se utilizan métodos de separación densitométrica y luego, por medio de

extracciones selectivas en las diferentes fracciones separadas, se pueden caracterizar su composición y otras propiedades entre las que Bendeck (2003), Andreux (2005) y Favoretto (2007) señalan como importantes el establecimiento de los contenidos de carbono en los AH (CAH) y en los AF (CAF), la relación de humificación (CAH/CAF), las densidades ópticas a diferentes longitudes de onda en el espectro UV-Visible y la composición elemental de los AH.

### **I.8. Sustancias Húmicas de los suelos y Calidad de Carbono Secuestrado.**

El carbono en el suelo es el componente principal del ciclo terrestre del carbono. Los residuos orgánicos de plantas, animales y microorganismos permanecen como componentes ubicuos de los ecosistemas terrestres. Estos residuos son mezclas complejas parcial o completamente transformados que constituyen la materia orgánica del suelo (MOS) e incluyen las sustancias húmicas (SH), sustancias derivadas de la lignina, carbohidratos y otras clases de compuestos orgánicos (Stevenson, 1994). El humus en el suelo se describe como los productos transformados de la materia orgánica en el suelo; en cualquier ambiente dado, la composición del humus puede relacionarse a la de la vegetación, el clima y la composición física y química del suelo o de los sedimentos donde se encuentre. Las SH son resistentes a la descomposición en mayor o menor grado en el ambiente edáfico y desempeñan un amplio rango de funciones en los procesos fundamentales biológicos, químicos y físicos que se llevan a cabo en el suelo (Frimmel y Chistman, 1988; Senesi y Miano, 1994).

Las materias húmicas del suelo, pueden ser definidas como complejos coloidales relativamente estables y resistentes a la acción microbiana que son mineralizables en forma más progresiva que la materia orgánica fresca (Duchaufour, 1972). El humus representa en el suelo, un estado avanzado de evolución de la materia orgánica, en oposición a la materia orgánica fresca de la cual proviene. Entre estos dos extremos, materia orgánica fresca y humus, existen una serie de productos intermediarios, de constitución y composición química muy variable.

Las sustancias de naturaleza húmica constituyen la mayor reserva de carbono orgánico del planeta, e incluyen una serie de productos macromoleculares de estructura muy compleja que se encuentran ampliamente distribuidos tanto en los suelos como en los recursos orgánicos fósiles (Almendros, 2000).

Solo una porción limitada de la materia orgánica del suelo se encuentra en forma de restos vegetales, animales y microbianos; estos residuos suelen ser rápidamente biodegradados y se encuentran asociados con la fracción mineral mediante enlaces lábiles de

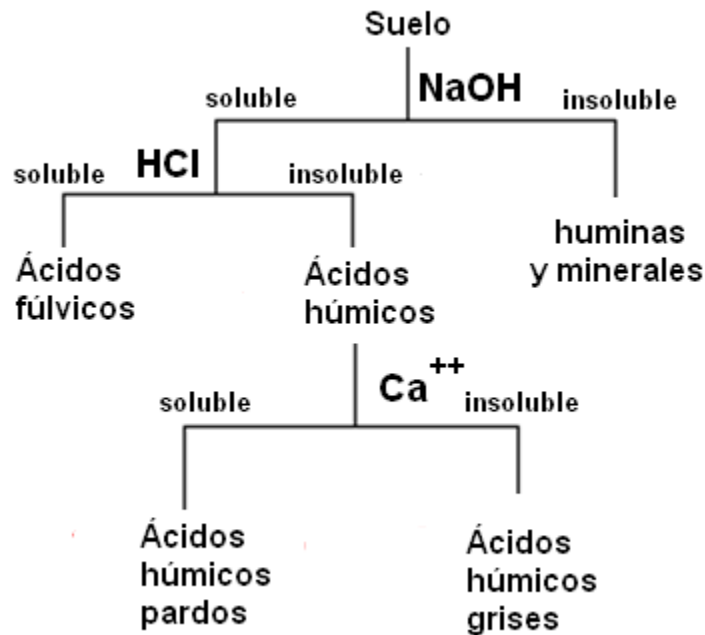
naturaleza predominante física. Aproximadamente la mitad de la materia orgánica de los suelos está constituida por las denominadas sustancias húmicas, que nos son estructuralmente comparables a los constituyentes de la biomasa; se forman en el propio suelo a partir de productos provenientes de la alteración o la biodegradación de los residuos orgánicos (Schintzer, 1972). Presentan intensa coloración oscura y alta resistencia a la transformación microbiana. Las sustancias húmicas son relativamente resistentes a la biodegradación: pueden presentar tiempos de residencia media en el suelo de varios miles de años. Constituyen el grupo de formas de carbono más abundante de la superficie de la Tierra (del orden de 30-1014 kg). Su composición química es variable, por lo que su caracterización química aporta datos de interés acerca de la estabilidad y calidad ambiental de los ecosistemas, de su fertilidad potencial y de la actividad fisicoquímica de los correspondientes suelos (Stevenson, 1982).

**I.8.1. Sustancias Húmicas del Suelo.** Las sustancias húmicas constituyen grupos heterogéneos que no están definidos por una composición determinada, sino que se establecen en base a su comportamiento frente a determinados reactivos (según sean solubles o precipiten). El humus al tratarlo con una serie de reactivos extractantes se separa en una serie de fracciones. Mediante los reactivos alcalinos, como la NaOH, se separan las huminas (que son insolubles) de los ácidos fúlvicos y húmicos, que son solubles. Estos últimos se separan mediante tratamiento ácido; los ácidos fúlvicos son solubles en HCl mientras que los húmicos son insolubles. El comportamiento frente a la presencia de iones calcio en la solución, diferencia dos fracciones de ácidos húmicos: ácidos húmicos pardos, solubles en presencia calcio y ácidos húmicos grises, insolubles en presencia de calcio (Dorronsoro, 2012) (Figura I.5).

Las características comunes de las sustancias amorfas de colores oscuros, polímeros tridimensionales de elevado peso molecular, de carácter ácido, constituidos por unos grupos funcionales: núcleo (grupos aromáticos nitrogenados, como el indólico y el pirrólico, y grupos bencénicos aromáticos, como el naftaleno y el benceno), grupos reactivos (responsables de importantes propiedades de la materia orgánica: hidroxilo, carboxilo, amino, metoxilo) y puentes de unión (nitriilo, amino, cetónicos) y cadenas alifáticas (Dorronsoro, 2012).

**II.8.2. Ácidos Fúlvicos.** Constituyen una serie de compuestos sólidos o semisólidos, amorfos, de color amarillento y naturaleza coloidal, fácilmente dispersables en agua y no

precipitables por los ácidos, susceptibles en cambio de experimentar floculación en determinadas condiciones de pH y concentración de las soluciones de cationes no alcalinos.



**Figura 1.5.** Sustancias Húmicas del Suelo

Fuente: [www.edafologia.ugr.es](http://www.edafologia.ugr.es)

**1.8.3. Ácidos húmicos.** Se presentan como sólidos amorfos de color marrón oscuro, generalmente insolubles en agua y en casi todos los disolventes no polares, pero fácilmente dispersables en las soluciones acuosas de los hidróxidos y sales básicas de los metales alcalinos, constituyendo un hidrosol que puede experimentar floculación mediante el tratamiento de los ácidos o los demás cationes ([www.edafologia.ugr.es](http://www.edafologia.ugr.es)).

Desde el punto de vista estructural, su molécula parece estar constituida por un núcleo de naturaleza aromática más o menos condensado, y de una región cortical con mayor predominio de radicales alifáticos, presentando en conjunto el carácter de heteropolímeros condensados.

**1.8.4. Huminas.** Los compuestos húmicos no extraíbles con reactivos alcalinos o huminas, constituyen un grupo de sustancias relativamente diferentes entre sí, cuyo origen puede tener lugar mediante la vía de herencia o la de neoformación. En el primer caso se encuentra la humina heredada ([www.edafologia.ugr.es](http://www.edafologia.ugr.es)).

La humina heredada está constituida por partículas de densidad menor de  $1.8 \text{ g cm}^{-3}$  pero que al contrario que la materia orgánica libre, con la que presenta otras diferencias de tipo químico, se hallan retenidas en los agregados de la fracción pesada del suelo mediante uniones que no se rompen por medio de la agitación mecánica común pero si por la de los ultrasonidos. Es mayoritaria en aquellos suelos que tienen una vegetación de difícil biodegradación. La fracción de humina heredada se encuentra débilmente ligada a la fracción arcilla de los suelos mediante una serie de enlaces lábiles que resisten la acción de la agitación mecánica clásica, pero no la de los ultrasonidos, que se utilizan para su extracción.

Entre las huminas de neoformación se encuentran las huminas de insolubilización extraíbles, de naturaleza comparable a la de los ácidos húmicos y fúlvicos, pero irreversiblemente ligada a la fracción mineral por medio de enlaces que solo pueden ser destruidos en el laboratorio por medio de agentes químicos que rompen la unión con los silicatos. Así obtenemos la humina unida al hierro y la humina unida a la arcilla (Humina de insolubilización). Al finalizar el tratamiento obtenemos un residuo que se denomina humina de insolubilización no extraíble ([www.edafologia.ugr.es](http://www.edafologia.ugr.es)).

**I.8.5. Clasificación de los Ácidos Húmicos.** Basándose en los resultados obtenidos de estudios realizados mediante las técnicas de espectroscopia visible e infrarroja, Kumada (1987) ideó un sistema de clasificación que ubica a los AH dentro de cinco grupos principales: A, B, Rp, Po y P, de acuerdo con su posición en un diagrama de dos coordenadas, como lo indica Ruiz (1997). Los grupos en los que se han clasificado los AH guardan relación con las propiedades del suelo, el tipo de vegetación y el uso del suelo. El hecho de que la clasificación propuesta esté basada en las propiedades ópticas de los AH (absorción de luz, espectroscopia IR) la relaciona directamente con las propiedades químicas de estas sustancias, lo que permite obtener cierta información sobre la composición y estructura de los distintos AH y la posibilidad de compararlos, en virtud de que se ha demostrado que las propiedades de los AH varían regularmente de acuerdo a su tipo y a su grado de humificación, de allí que la aplicación del esquema de Kumada (1987) permite la comparación de AH provenientes de diferentes suelos, al suministrar una información relativa en cuanto a la presencia de grupos funcionales, carácter aromático, contenido de nitrógeno, acidez total, y grado de humificación.

Kumada (1987) propone una teoría para la génesis de los AH; de acuerdo a ella, el proceso de humificación de los mismos ocurre a partir de los AH tipo Rp (los cuales representan a aquellos que están relacionados con los primeros estados de humificación de la materia orgánica), que evolucionan hacia ácidos del tipo B, y estos finalmente hacia el tipo A. Estos últimos corresponden a las formas más evolucionadas dentro de los AH, pero cada tipo exhibe una forma relativamente estable en el suelo del cual es extraído, aunque en suelos fuertemente ácidos, los AH del tipo Rp son reemplazados por ácidos de tipo P. Los AH tipo Rp y B representan formas inmaduras y transitorias de los AH tipo A (Ruiz, 1997).

Los estudios realizados mediante espectroscopia de resonancia magnética nuclear (<sup>13</sup>-RMN) indican que los AH de tipo Rp y P son ricos en C-alquílico, que el C-aromático y los grupos carboxilo y carbonilo dominan principalmente en los AH tipo A, mientras que en los tipo B ocupa una posición intermedia (Theng *et al.*, 1989).

Los AH, después que se han liofilizado pueden presentarse en dos aspectos diferentes (Kumada, 1987):

- Como gránulos angulares, duros, de color negro brillante, y
- Como una película muy delgada o filamentos de color pardo o pardo-amarillo.

Se ha propuesto que el progreso de la humificación puede expresarse mediante el incremento en la intensidad del color del ácido húmico de acuerdo con la secuencia de los tonos: pardo amarillo-->pardo-->pardo oscuro-->negro. Mientras más intenso es el color, mayor es el grado de humificación (Kumada, 1987).

Las teorías más recientes proponen que la formación de las sustancias húmicas comienza con la degradación de los materiales vegetales, como consecuencia del metabolismo microbiano. En los suelos bien aireados tiene lugar la ruptura microbiológica de los enlaces en la lignina, específicamente la ruptura enzimática del anillo bencénico. A través de un conjunto de reacciones se producen una serie de compuestos tales como los polifenoles, los cuales son oxidados a quinonas, que tras un proceso de polimerización, mediante su reacción con otras unidades fenólicas, péptidos y aminoácidos, forman las grandes moléculas de AH (Stevenson y Butler, 1969). En este proceso el oxígeno atmosférico juega un papel muy importante, ya que la ruptura oxidativa de la lignina constituye un paso fundamental (Ruiz, 1997).

### **I.9. Secuestro de Carbono y Calidad del Carbono Secuestrado.**

El Secuestro de Carbono se define como el proceso por el cual el CO<sub>2</sub> de la atmósfera se incorpora en formas almacenadas fundamentalmente en el suelo y la biomasa, quedando

temporalmente inmovilizado respecto a la circulación biogeoquímica durante largos periodos de tiempo (Valera *et al.*, 2005). En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa), el CO<sub>2</sub> fluye para regresar al ciclo de carbono (Martínez *et al.*, 2004). El secuestro de carbono se efectúa en los ecosistemas forestales mediante el intercambio de carbono con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, llevando al almacenamiento en la biomasa y en el suelo (De Petre, 2005; Jandl, 2001).

El almacenamiento de carbono en árboles, es un servicio ambiental que valoriza la incorporación de especies arbóreas en sistemas agroforestales, y se suma así a posibles beneficios para el productor que adopta estos sistemas alternativos, beneficios hídricos en relación con el incremento productivo de pastizal y bosque, y beneficios al nivel de fijación de carbono por medio de “bonos verdes” o “de carbono” o su equivalente en impuestos (IPCC, 2001).

Los mecanismos para la captura de carbono que son viables actualmente se enfocan sólo en un subproceso del ciclo de carbono en la naturaleza: la captura terrestre y específicamente en la captura de carbono por parte de ecosistemas boscosos.

Recientemente, se ha puesto mucho énfasis en la necesidad de aumentar el secuestro del carbono del CO<sub>2</sub> atmosférico como MOS, debido a la preocupación internacional acerca de las emisiones de gases de invernadero y del calentamiento global. Estas inquietudes se han planteado en reuniones internacionales, nacionales y regionales. El secuestro de C es por supuesto una consideración importante, pero el aumentar la proporción de la MOS, debiera ser también una prioridad con objeto de aumentar la calidad de nuestros suelos y mejorar su fertilidad, estructura, y el ciclo de los elementos biógenos. Este papel se relaciona con el potencial de los suelos de servir como sumideros de C para ayudar a mitigar el aumento en los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

A nivel nacional, la deforestación de los bosques es actualmente la segunda fuente de emisiones de GEI, contribuyendo aproximadamente con el 30% del total (Ordoñez y Maser, 2001). Asimismo, los bosques de México pueden ser extremadamente vulnerables al cambio climático (Villers y Trejo, 1998) y representan un almacén de carbono aproximado de 8 GtC (Maser *et al.*, 1997), cantidad equivalente a las emisiones mundiales actuales de CO<sub>2</sub>. La capacidad de almacenamiento de carbono en estos bosques se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales.

Un problema fundamental para la determinación de las emisiones de los ecosistemas forestales, es la gran incertidumbre en los procesos de cambio de uso de suelo, específicamente, cuánto y cómo se pierden los bosques a través del tiempo (IPCC, 1995). Entre los factores físicos y biológicos relacionados con los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo destacan las características del relieve del terreno, las propiedades físicas y químicas del suelo, la disponibilidad de fuentes de agua, el estado y la estructura de la vegetación. Además de los procesos naturales de cambio dinámico de los propios ecosistemas como la regeneración y sucesión, hay numerosos factores antropogénicos que promueven la transformación de las áreas naturales impactándolas a distintos niveles y con diferentes intensidades, desencadenando cambios en las relaciones entre la diversidad biológica y el funcionamiento del ecosistema (Ordóñez y Masera, 2001).



## CAPÍTULO II

### ANTECEDENTES

Existen pocos antecedentes sobre estudios de suelos en la región del Parque Nacional La Malinche, los más relacionados con este trabajo son:

- Llaguno *et al.* (2005), realizaron un estudio en el que señalan que la lluvia captada por los suelos de la zona boscosa del volcán La Malinche, es muy importante en la recarga de los mantos freáticos y en el abastecimiento de agua para la ciudad de Puebla y que esta recarga es afectada por la deforestación, la disminución de la precipitación media anual y el aumento de la demanda de servicios de agua potable. Con el objetivo de determinar los cambios en la precipitación media anual y los regímenes de humedad del suelo ocurridos en los últimos 20 años en la región del estado de Puebla aledaña a al volcán La Malinche, los autores evaluaron los climogramas de 7 estaciones meteorológicas de la CNA correspondientes a los estados de Puebla y Tlaxcala, se establecieron los balances hídricos y se definió el régimen de humedad del suelo para los periodos 1985-1995 y 1995-2005. Sus resultados indican que en algunas zonas la precipitación media anual disminuyó hasta en 80 mm, mientras que en otras menos afectadas hay una disminución menor a 20 mm. El régimen de humedad de los suelos se estableció como ústico. Los autores concluyeron que las zonas más afectadas son las más urbanizadas e industrializadas y las menos afectadas presentan aún relictos de bosque y que la disminución de la precipitación combinada con otros factores ambientales tales como el relieve, el material geológico, el régimen de humedad y uso del suelo, están generando la escasez del recurso agua, por lo que es indispensable rediseñar estrategias para evitar la deforestación y promover la sostenibilidad del bosque.
- Wong y Villers (2006), realizaron un estudio sobre el peligro y combate de incendios forestales debido a la interacción entre los factores meteorológicos y las características de los combustibles, donde se analizaron la humedad de los combustibles muertos sobre el suelo, la cual depende de su diámetro y de la humedad relativa principalmente. Los autores estudiaron combustibles de 0.6 a 2.5 y de 2.6 a 7.5 cm de diámetro en las comunidades donde predominan especies de los géneros: *Quercus*, *Alnus*, *Abies* y *Pinus* del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México. Los resultados a los que llegaron demuestran: a) que la humedad de los combustibles varió de acuerdo con las

condiciones atmosféricas en los diferentes sitios y horarios, b) que los combustibles con mayor diámetro tuvieron una menor relación entre la superficie de exposición al medio y su volumen ( $120 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ) y que los de menor diámetro la relación aumentó ( $235 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ), teniendo estos últimos una mayor probabilidad de incendiarse. Concluyeron que durante la temporada de incendios en los meses de febrero, marzo y abril, la humedad de los combustibles en *Alnus jorullensis* y *Pinus montezumae* fue mayor a 25% que es aquella que impide la combustión, conocida como humedad de extinción; así también que en *Quercus crassipes*, *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa-Pinus teocote*, la humedad de los combustibles fue menor a 25% por lo que fueron las comunidades más vulnerables a incendios.

- Marín *et al.* (2007), en su investigación concluyen que dentro de la problemática ambiental y del deterioro de los bosques, los factores principales son: la tala clandestina, la deforestación, la erosión de los suelos originada por el cambio de uso del mismo, los incendios forestales y el sobre pastoreo. Los autores realizaron un trabajo, teniendo como objetivos estudiar los patrones espaciales de diferentes géneros de hongos ectomicorrízicos, y obtener y conservar in vitro el germoplasma de las especies colectadas en la parte poblana del Parque Nacional Malintzi.

Los resultados obtenidos fueron: los puntos de muestreo ubicados por medio de coordenadas geográficas por el sistema GPS. Con los puntos seleccionados se examinó la hipótesis de aleatoriedad espacial completa, determinándose los meses en que los diferentes géneros presentan agrupamientos. Se obtuvieron ocho cepas aisladas pertenecientes a los géneros: *Russula sp*, *Lactarius sp*, *Cantarelus*, *Suillus sp*, y *Bolletus spp*. Los géneros aislados y preservados presentaron una adaptación mayor al medio PDA, sin embargo, su periodo de crecimiento es muy lento, tardando un promedio de 40 días para que las colonias alcancen 3 ó 4 centímetros de diámetro.

Se logró establecer, a través de los gráficos LHAT, los meses en que los géneros *Amanita spp.*, *Suillus spp.*, *Russula spp.*, *Cotinarius spp.*, *Lactarius spp* y *Helvella crispa* rechazan la hipótesis de aleatoriedad espacial completa y por tanto presentan tendencias de agrupamiento.

- Vela *et al.* (2007), desarrollaron un trabajo sobre la regeneración vegetal natural la cual se lleva a cabo en sitios donde las condiciones edafoclimáticas son adecuadas para desencadenar la germinación y pudieran establecerse las nuevas plántulas que ocuparan el lugar de los árboles al alcanzar su límite de vida, con los objetivos de

cuantificar la población natural de renuevos de *Pinus montezumae* Lamb., y determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos de cinco sitios en La Malinche, México. Encontrando que por sus características físicas y químicas, los suelos de los sitios estudiados resultaron muy similares, ya que se formaron a partir del intemperismo de cenizas volcánicas, por lo que presentan una secuencia de evolución A/C; tienen una estructura poliédrica subangular, debidamente desarrollada; con abundantes raíces; su densidad aparente y real permiten el intercambio adecuado de aire y la absorción de nutrimentos, dominan las texturas areno-migajosas en los horizontes superficiales, los cuales presentan un pH muy ácido, son ricos en MO, con una CIC media y una saturación de bases mayor a 50%, dominada por  $\text{Ca}^{2+}$ . Obteniendo como resultado que los sitios entre 3,000 a 3,200 m con orientación al N tuvieron 58% de la población de renuevos de *P. montezumae* Lamb., donde predominan los que tienen un tamaño de 1.50 a 2.50 m; en los sitios donde la altitud es mayor a 3200 m disminuyó notablemente la población de *P. montezumae* Lamb., llegando a 7% del total, con una altura de 8 a 12 m, los de mayor tamaño. Los autores concluyeron que la altitud y la temperatura son los factores principales que determinan la presencia de renuevos, y que el arbolado padre presenta las condiciones adecuadas para liberar semillas y propiciar la continuidad de la masa forestal, aunque disminuye su número en altitudes mayores a los 3000 m, debido a la tala clandestina e incendios. Además es común un sotobosque construido por *Muhlenbergia macroura* (HBK), *Stipa ichu* y *Lupinus elegans* HBK., las cuales se consideran indicadoras de estas actividades.

- Ruiz-Soberanes y Gomez-Alvarez (2010), en su estudio mastofaunístico del Parque Nacional Malinche, realizaron un inventario de los mamíferos silvestres que habitan en el Parque Nacional Malinche a través de capturas y registros de rastros. La distribución de cada especie a lo largo del volcán Malinche se determinó en cuatro tipos de vegetación: cultivos (15 especies), bosque de pino (27 especies), bosque de pino-aile y oyamel (19 especies), y zacatonal de alta montaña (cuatro especies). Encontraron que durante 2007 y 2008, se registraron un total de 27 especies pertenecientes a 22 géneros, 14 familias y 7 órdenes, incluyendo 5 especies endémicas a México (*Sylvilagus cunicularius*, *Peromyscus difficilis*, *P. melanotis*, *Neotomodon alstoni* y *Sorex oreopolus*). Concluyendo que los mamíferos del volcán Malinche representan el 40.3 % de las especies de mamíferos del estado de Tlaxcala.

- Arreola *et al.* (2010), efectuaron un trabajo sobre la calidad de suelo de los sistemas forestales en referencia con cambios en el clima y capacidad del suelo para infiltrar agua en la zona de la Malinche con los objetivos de: a) determinar la calidad del suelo y como afecta la variación del clima a su capacidad de infiltración de agua; b) analizar el comportamiento climático en la región durante el período 1980-2006 y c) comparar la capacidad de infiltración del agua en los suelos forestales conservados con respecto a los degradados; encontrando que no existen diferencias claras de que los cambios en el clima hayan afectado la capacidad de infiltración del suelo y que no hay diferencias en los climogramas complementarios que indiquen cambios en la acumulación de humedad en el suelo. Encontraron diferencias significativas en la capacidad de infiltración de agua de los suelos forestales degradados respecto a los conservados. Los autores concluyeron que es posible mejorar los servicios ambientales que proporcionan los suelos de “La Malinche”. Se paliaría el problema reforestando la zona afectada y evitando la deforestación. En este trabajo se recomiendan estrategias de reforestación y restauración de suelos.
- Castañeda (2011), en su tesis de licenciatura, realizó un análisis de los impactos potenciales en las comunidades vegetales del Parque Nacional Malinche según ciertos escenarios de cambio climático. Construyó el escenario climático base con las variables de temperatura, precipitación para el área de estudio, así como la descripción de la vegetación en base al método fitosociológico, reforzando los resultados mediante un análisis de clasificación aglomerativa. Aplicó dos Modelos de Circulación General para analizar el cambio climático, estos fueron el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-TR 90) y el HADLEY (HADLEY 3-TR-00), con dos escenarios de emisiones (A2 y B2) para los horizontes temporales de 2020 y 2050. El análisis de los impactos del cambio climático se realizó bajo tres escalas de estudio, el primero a nivel de pisos bioclimáticos, el segundo por comunidad vegetal aplicando un índice que relacionó las variables e precipitación y temperatura; además de las modificaciones climáticas en las comunidades vegetales, y por último se evaluó el posible impacto de algunas especies presentes en las diferentes comunidades vegetales. Las proyecciones de los modelos de cambio climático indicaron: a) que en el volcán Malinche podría haber una reorganización de las comunidades tanto a nivel altitudinal como en su composición, siendo las comunidades de *Calamagrostis tolucensis*- *Trisetum rosei* y *Pinus hartwegii*-*Muhlenbergia macroura* las más vulnerables; b) que el clima posiblemente se haría más

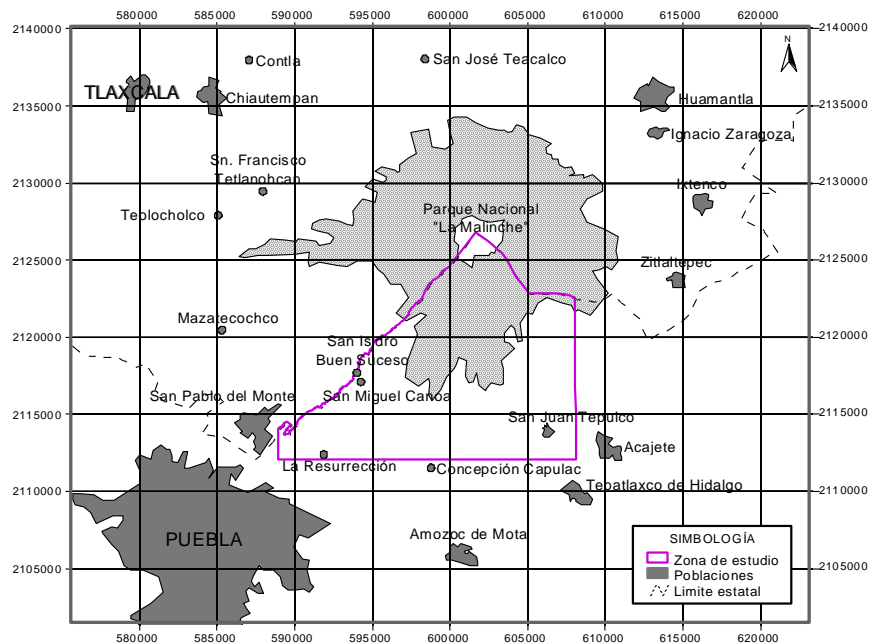
seco, influencia del aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación; c) se perdería el tipo climático frío y el semifrío solo permanecería hasta el 2020 además de la aparición de una sequía veraniega en la zona; d) las comunidades estarían sometidas a cambios muy rápidos y de gran impacto por lo que las especies se verían obligadas a desarrollar estrategias que les permita adaptarse a las nuevas condiciones prevalecientes, de lo contrario verían reducida su distribución o desaparecerían en la zona. En cuanto al comportamiento de las especies, Castañeda concluye que un 8% de las especies mantienen su distribución, el 88% de las especies reducen su distribución, y solamente una especie (4%) expande su distribución según escenarios para el 2020. El 12% de las especies desaparecen en 2050.

## CAPÍTULO III

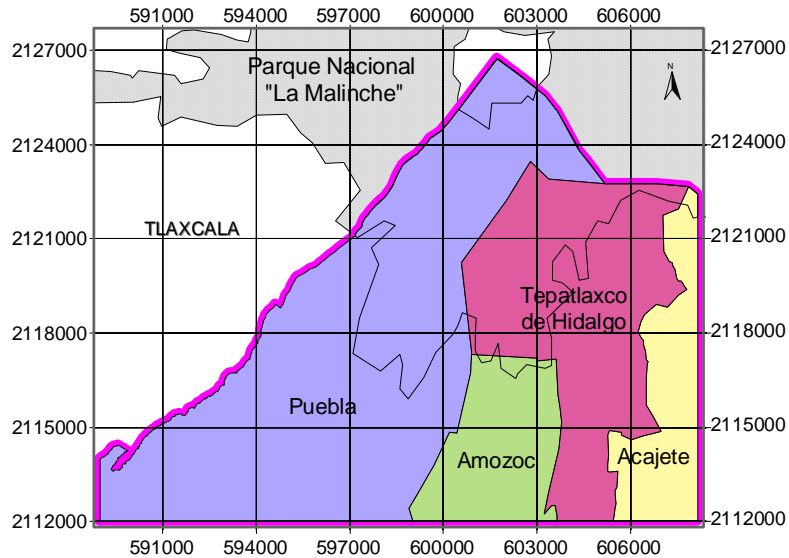
### DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### III.1. Localización geográfica.

La zona de estudio se ubica en la parte central oriente de México formando parte del Eje Neovolcánico Transversal (ENT). Sus coordenadas geográficas son los paralelos  $19^{\circ} 05' 55''$  y  $19^{\circ} 13' 48''$  latitud norte y los meridianos  $97^{\circ} 53' 54''$  y  $98^{\circ} 19' 42''$  de longitud oeste. Las coordenadas UTM son: 589009.76, 608179.69 al este y 2111997.72, 2126721.23 al norte (Figura III.1). Comprende los municipios poblanos de Amozoc, Acajete, Tepatlaxco de Hidalgo y Puebla (Figura III.2). Al norte colinda con los municipios tlaxcaltecos de San Juan Ixtenco, Huamantla, San Luis Teolocho, Zitatepec de Trinidad Sánchez Santos, San Pablo del Monte y San Francisco Tetlanohcan (Llaguno, 2007).



**Figura. III.1.** Localización geográfica de la zona de estudio



**Figura III.2.** División Municipal de la zona de estudio

## III.2. Aspectos Físicos.

**III.2.1. Orografía.** La Malinche es un volcán apagado con una altitud de 4,460 metros. Es notable por las rocas descubiertas de su cima, y está formado por desprendimientos de la Sierra Nevada. Sus faldas inferiores se tienden radialmente con pendientes poco pronunciadas sobre un gran altiplano a 134 kilómetros, en tanto que sus laderas centrales, desde 3300 msnm, son pronunciadas y se levantan hasta los 4,460 msnm. Las características más notables del volcán son las siguientes:

- Una gran barranca que baja hacia el poblado de San Juan Ixtenco al oriente.
- El rasgo circular al este de la cima llamado Octlayo e identificado como antiguo cráter.
- La destacada prominencia sobre la ladera sur, denominada Xaltonally o Arenal del sol, que alcanza 3800 msnm.
- El cerro Xalapezco, al pie del volcán, junto a San Juan Ixtenco.
- Huellas de acción glacial y rotura de roca por hielo (INEGI, 1986).

**III.2.2. Geología.** La Malinche, por el periodo de formación, es considerada como una de los primeros volcanes que conformaron la cordillera Neovolcánica (INEGI, 1986). Los grandes volcanes del centro del país como La Malinche comenzaron a formarse a mediados del periodo terciario, hace más o menos 35 millones de años.

En el terciario superior se formaron grandes depósitos en las faldas del volcán denominados brechas sedimentarias.

Los sedimentos del Oloceno que se encuentran distribuidos al pie de la ladera, fueron descargados en cantidades considerables de material arenoso y gravoso.

Relativamente resistentes a la meteorización se muestran los sedimentos claros arenosos volcanoclásicos que se encuentran sobre las laderas superiores del volcán La Malinche, explicándose su existencia por una erupción del cráter del Octlayo.

El material eruptivo, consistente en carbonatos del cerro Xalapazco, también se encuentra en las partes bajas del volcán.

En la petrología de las rocas volcánicas, se reconoció la presencia de rocas del Cuaternario en la cual éstas presentan contenidos minerales y una composición química de la siguiente manera; Dazitas, leuco-cuarzo-latiancitas, leuco andesitas, minerales típicos con hornablenda y biotita. Sobre la cima del volcán se encuentran rocas ígneas extrusivas, del tipo de las andesitas y sobre sus faldas predominan rocas sedimentarias como brecha sedimentaria; además se encuentran tobas y cenizas volcánicas del Cuaternario del grupo Chichinautzí, así como aluviones y domos volcánicos (INEGI, 1986).

**III.2.3. Hidrografía.** La zona estudiada forma parte de la Cuenca Hidrográfica del Río Atoyac-Zahuapan. Presenta una sola corriente permanente, denominada Río Barranca de La Malinche, la cual se origina en el lado este del volcán, atravesando el Municipio de Trinidad Sánchez. Las demás corrientes son temporales: El Río Apizaco, al Noroeste; el Río San Juan, al Oeste; el Río Barranca Seca; el Río Barranca de la Soledad y el Río Barranca Hejotitla, al Suroeste (INEGI, 1986).

El nivel freático de las aguas subterráneas en La Malinche es relativamente poco profundo, sobre todo a altitudes menores de 3000 msnm, pues el material consolidado de los suelos tiene un alto grado de permeabilidad; por el contrario, a altitudes mayores, el material consolidado tiene un bajo grado de permeabilidad.

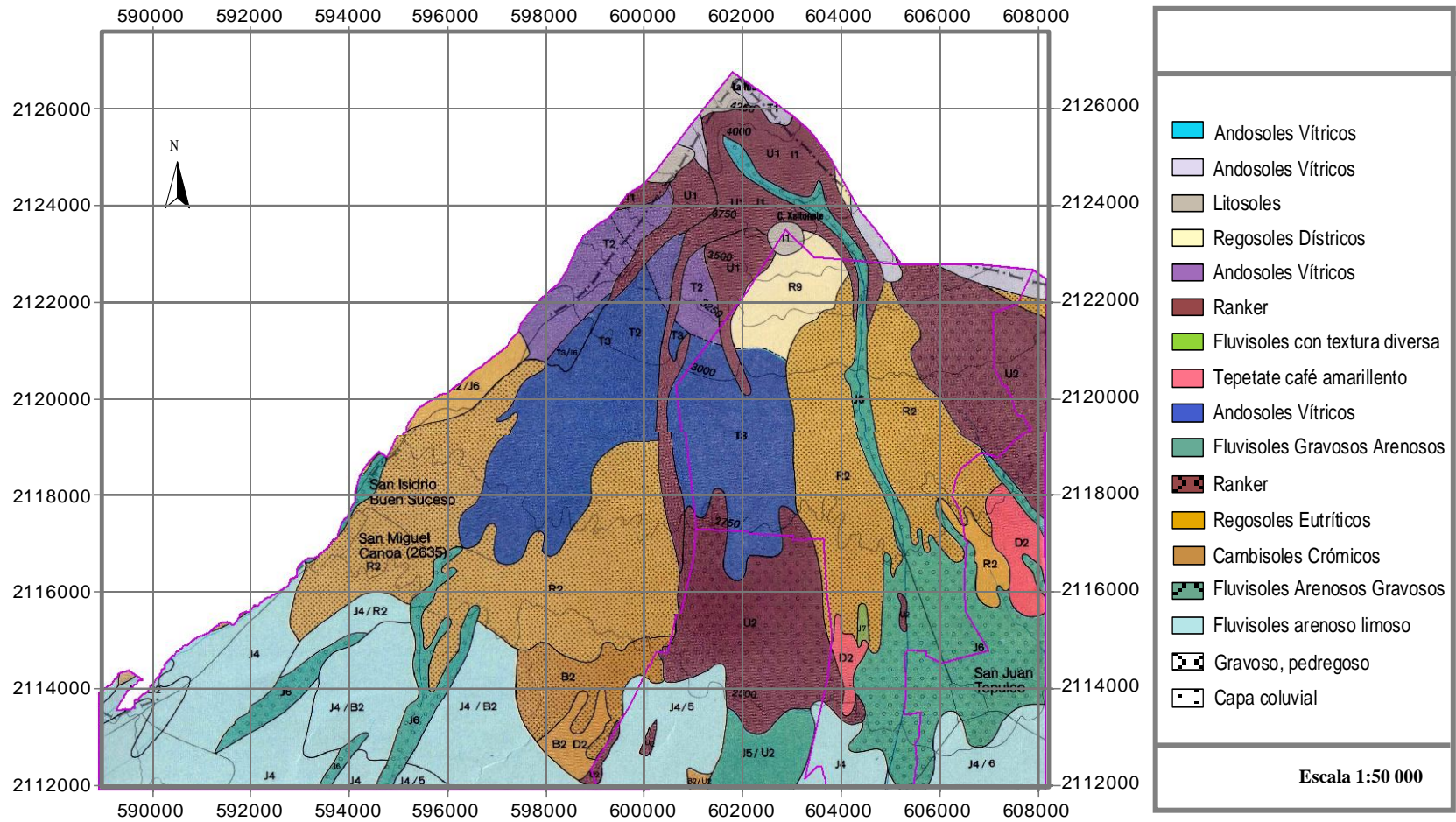


Las fuentes de abastecimiento y el volumen de extracción promedio de agua potable en los estados de Tlaxcala y Puebla, nos demuestran la gran importancia que tiene esta zona de La Malinche como abastecedora del vital líquido, sobre todo a partir de los mantos freáticos (GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002).

**III.2.4. Clima.** Los principales tipos de clima que corresponde a la zona de estudio según la clasificación Köppen modificada por Enriqueta García (GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002), son:

- **C(w<sub>1</sub>)(w):** Clima templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual varía entre 12 y 18° C, mientras que la temperatura del mes más frío varía entre 3 y 18° C. La precipitación total anual tiene un rango de 600 a 1000 mm. El porcentaje de precipitación invernal con respecto a la anual es menor de 5. Se presenta en la parte meridional de la región. Dependiendo de la precipitación se subdivide en Cb(w1)(w)(i')g, Cb(w1)(w)(i')gw' y Cb(w1)(w)(i') .
- **C (e) (w<sub>2</sub>) (w):** Clima semifrío y subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 5 a 12° C; La precipitación total anual es de 300 a 600 mm y la del mes más seco registra un valor de 40 mm. El por ciento de precipitación invernal con respecto a la anual es menor de 5. Se presenta en las faldas superiores de La Malinche y de la Sierra Nevada.
- **E (T) H:** Clima frío. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual entre 2 y 5° C. La temperatura media del mes más cálido es menor de 6.5° C, mientras que la del mes más frío es menor a 0° C. Este clima comprende las partes más elevadas de la entidad, es decir, aquellas que se encuentran por arriba de los 4000 msnm. Se presenta en la cumbre de La Malinche y cubre alrededor del 1% de la superficie.

**III.2.5.Suelos.** El mapa de la Fundación Alemana para la Investigación Científica (Werner *et al.*, 1976) denominado "Mapa de suelos de la Cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores" señala que los suelos predominantes en la zona de la Malinche son Andosoles, Regosoles, Litosoles, Fluvisoles, Cambisoles y Rankers (Figura III.3). Las subunidades se describen a continuación:



**Figura III.3.** Suelos predominantes en La Malinche, Estado de Puebla (tomado de Werner, *et al.*, 1976)

- Andosoles Vitríticos ( $T_1, T_2, T_3, T_4$ ): Son predominantemente arenas andesíticas-dazíticas que se encuentran distribuidas a alturas que van de los 2500 m. hasta los 3900 m. Se diferencian por su textura, material parental y pedregosidad. La arena a arena limosa, pedregoso o más pedregoso pertenece a  $T_1$ ; migajón arenoso, levemente pedregoso a  $T_2$ ; migajón arenoso a arena  $T_3$ ; arena limosa a levemente migajosa y levemente pedregoso a  $T_4$ .
- Litosoles ( $L_1$ ): Vulcanitas candesitas, dacitas, ignimbritas, lavas, tufas coherentes y tufitas, metamorfitas y rocas sedimentarias, sin carbonato; arena a limo; pedregoso a muy pedregoso y de conglomerados volcánicos de sedimentos compactados cerca de San Martín Texmelucan, localmente recubierta de la capa coluvial (sedimentos recientes de cenizas volcánicas en su mayoría coluviales debilmente humosos, localmente contiene arena eólica; limo arenoso a arena, localmente arena migajosa); arena migajosa a franco, pedregoso a muy pedregoso.
- Ranker ( $U_1$ ): Vulcanitas o “tobas” compactados de origen volcánico del terciario, localmente recubiertas de la cpa coluvial; arena migajón a muy pedregoso.
- Ranker ( $U_2$ ): “Lahar” del Popocatepetl y de la Malinche fuertemente compactados.
- Fluvisoles arenosos migajosos limosos ( $J_3$ ): Sedimentos fluviales y coluviales recientes; limo franco arenoso; contiene localmente carbonato.
- Fluvisoles arenoso limoso ( $J_4$ ): Sedimentos fluviales recientes y muy recientes, localmente recubierto de arena eólica; migajón arenoso, levemente humoso; contiene localmente carbonato.
- Fluvisoles Gravosos Arenosos ( $J_5$ ): Sedimentos fluviales recientes, arena gravosa a franco gravosa
- Fluvisoles Arenosos Gravosos( $J_6$ ): Sedimentos fluviales recientes y muy recientes, arena gravosa a grava arenoso, localmente con bloques de rocas.
- Fluvisoles con textura diversa ( $J_7$ ): Material acumulado muy reciente de pendientes erosionadas (coluvión).
- Regosoles Eutríticos ( $R_2, R_3$ ) Sedimentos de toba (cenizas volcánicas de translocación eólica); arena fina limosa a limo arenoso, que en el caso de  $R_3$  contiene localmente carbonato.

- Regosoles Eutríticos (R<sub>5</sub>) Terraplenes antropógenos, material detrítico y montículos; arena a migajón limoso, a menudo muy pedregoso.
- Regosoles Dístricos (R<sub>6</sub>) Cenizas reolíticas, sedimento de nube incandescente, arenas y poméz descompuestas; arena a arena limosa.
- Regosoles Dístricos (R<sub>7</sub>, R<sub>9</sub>): Arena eólica de materiales de las partes altas de la. La textura para R<sub>7</sub> es arena a arena poco migajosa y arena limosa, gravosa para R<sub>9</sub>.
- Regosoles Calcáricos (R<sub>11</sub>): Arena volcánica del cerro Xalapazco; arena a arena limosa, contiene carbonato.
- Tepetate café amarillento (D<sub>2</sub>): Sedimentos de “toba” café amarillento, fuertemente compactado, localmente recubierto de la capa coluvial arenosa; arena limosa a franco limoso.
- Cambisoles crómicos (B<sub>2</sub>): (suelos de barro café-amarillentos) Sedimentos de “toba” de color café amarillento, a menudo recubierto de la capa coluvial arenosa; arcilla arenosa a migajón arcilloso sobre arena migajosa.
- Cambisoles Eutríticos (B<sub>3</sub>): (suelos de barro café claro) Sedimentos de “toba” limo arenoso de color café claro, a menudo recubierto de la capa coluvial arenosa; arena limosa a franco.

**III.2.6. Flora.** Por estratos altitudinales, la vegetación se distribuye cómo sigue:

- El bosque a altitudes menores de los 2500 msnm ha sido desplazado casi en su totalidad por agricultura de temporal; sin embargo es posible encontrar, principalmente, especies de pino y encino como *Pinus leiophylla*, *Quercus laurina* y *Q. Crassifolia*.
- En la cota de 2500 msnm, el bosque de *Quercus rugosa* y *Q. laurina* es el más característico. A este bosque frecuentemente se le asocia *Pinus montezumae*, *P. teocote* *P.pseudostrobus* y *Garrya laurifolia*. En la mayoría de los casos se trata de un bosque perturbado debido a que sus troncos son empleados para elaborar carbón, por lo que es muy común observar brotes a partir de tocones.
- Entre los 2500 y 3100 msnm, impera el bosque de *Pinus montezumae*; en ocasiones puede encontrarse *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote*, *Alnus jorullensis*, *Abies religiosa*, *Quercus laurina*, *Quercus crassipes* y *Arbutus xalapensis*.

- Al sur del volcán a los 3,300 msnm, en el estado de Puebla, se encuentra una pequeña comunidad de vegetación secundaria denominada chaparral (encinos bajos y delgados que brotaron a partir de tocones), siendo el más común *Quercus laurina*. Así como otras especies arbustivas tales como: *Ceanothus coeruleus*, *Arctostaphylos discolor* y *Baccharis conferta*. En general, es una comunidad que surgió después de una tala total y un incendio que dejó la superficie desprovista de vegetación y propició las condiciones para el establecimiento de dicha comunidad.
- El bosque de oyamel se presenta generalmente en los 2,800 y 3,500 msnm, casi siempre sobre suelos derivados de sedimentos aluviales, poco desarrollados, profundos y gravosos como los que predominan en las barrancas. El estrato arbóreo característico de este bosque es la *Abies religiosa*. De otras especies arbóreas presentes se pueden mencionar: *Arbutus xalapensis*, *Prunus serotina* y *P. hartwegii*. El estrato arbustivo se encuentra formado por individuos inmaduros de *Abies religiosa* así como *Salix paradoxa*, *Buddleia parviflora*, *Salix oxylepis* y *Ribes ciliatum*.
- En altitudes de los 2,600 a los 3,800 msnm se presenta pastizal natural o zacatonal. El tipo de vegetación predominante son las gramíneas. Indudablemente se trata de una comunidad secundaria favorecida por el disturbio, ésta formación vegetal se presenta en forma de manchones relativamente pequeños, siendo más frecuente encontrar a esta comunidad ocupando los claros en medio del bosque de pino y oyamel, en comunes son: *Festuca tolucensis*, *Muhlenbergia macroura* y *Stipa ichu*.
- Las asociaciones de pino-encino y encino-pino, asociación de pino-aile-oyamel, asociación de encino-aile, asociación de encino-pino-oyamel y asociación de pino-encino-aile se desarrollan entre los 2,800 y 3,600 msnm.
- En los 3,500 y 4,200 msnm, se desarrolla comúnmente la especie arbórea *Pinus hartwegii*. El estrato arbustivo está constituido por pinos inmaduros de la misma especie (*Pinus hartwegii*), *Senecio cinerarioides*, *S. salignus* y frecuentemente *Baccharis conferta* en sitios perturbados.
- Por último, en las partes más altas de la montaña, entre los 4,000 y 4,300 msnm, se presenta páramo de altura o zacatonal alpino. El páramo es una comunidad exclusivamente herbácea, donde se desarrollan plantas de talla baja, sin ningún elemento arbóreo, con excepción del cedrillo enano

(*Juniperus monticola*). Los pastos (gramíneas) son las especies más abundantes, siendo las especies principales por su abundancia *Festuca tolucensis*, *Calamagrostis tolucensis*, *Enneapogon sp.*, *Hilaria Cenchroides*, así como *Plantago tolucensis*, *Senecio mairetianus* *Arenaria repens*, *Drava nivicola*, *Cirsium nivale* y *Castilleja tolucensis* entre otras (GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002).

**III.2.7. Fauna.** En cuanto a fauna se carece de información completa sobre el inventario de todas las especies, sin embargo, se pueden destacar un total de 5 especies de anfibios y 11 de reptiles; 77 especies de aves y 27 de mamíferos. Se consideran de gran importancia las 16 especies endémicas existentes, entre ellas las salamandras *Pseudoeurycea gadovii* y *P. Leprosa*, la codorniz pinta *Cyrtonyx montezumae*; el tejón, *Nasua nasua* y el lince o gato montés, *Lynx rufus*. Además de ocho reptiles: cinco saurios y tres serpientes, *Crotalus t. triseriatus*, *Sistrurus ravus* y *Thamnophis scalaris* scaliger; tres aves: *Chepito serrano*, *Catharus accidentalis*; el chipe orejas de plata, *Ergaticus ruber* y el zorrillo rayado *Oriurus superciliosus* (Gómez-Alvarez *et al.*, 1993).

Animales como el murciélago, la ardilla, el ratón y ratón espinoso, las comadrejas y conejos se pueden encontrar en las faldas del volcán.

### **III.3. Aspectos Socioeconómicos.**

El volcán La Malinche ha sustentado la supervivencia de un gran número de pobladores, no sólo de las comunidades asentadas en el parque nacional, sino también de comunidades fuera de éste. La zona de estudio se ve influenciada no sólo por municipios poblados cercanos a ésta, la explotación de recursos naturales no respeta límites municipales ni estatales. Por su cercanía, seis municipios correspondientes al estado de Tlaxcala, tienen una influencia importante sobre la zona de estudio. Estos municipios son: San Juan Ixtenco, Huamantla, San Luis Teolocho, Zitlatepec de Trinidad Sánchez Santos, San Pablo del Monte y San Francisco Tetlanohcan.

La situación socioeconómica tanto de la zona de estudio como la de las poblaciones tlaxcaltecas con las que colinda la zona de interés se resume a continuación:

**III.3.1. Demografía.** De acuerdo con datos obtenidos del II Censo de Población y Vivienda correspondiente al año 2005, la población en la zona de estudio asciende a 1 632 374 habitantes, de los cuales, la mayor parte se concentra en el municipio de Puebla.

La densidad de población promedio en la zona se calcula en 964.155 habitantes por kilómetro cuadrado.

Para el año 2003, el INEGI, registró 40,897 de nacimientos y 7,405 de defunciones en la zona. La tasa de natalidad promedio es de 29.81%, es decir, hay 29.81 nacimientos por cada 1000 habitantes. Adicionalmente se estima que la tasa de mortalidad promedio para los cuatro municipios es de 4.54%.

Los municipios con mayor tasa de crecimiento anual son Amozoc de Mota con 3.56% y Puebla con el 1.75%.

La zona de estudio se caracteriza por el número significativo de pobladores que hablan lengua indígena e indígena-español. Las comunidades que muestran los porcentajes más altos en esta condición son San Miguel Canoa, Sección Décima, y San Miguelito, del municipio de Puebla y San Juan Tepulco en el municipio de Acajete. La lengua indígena que predomina en la zona es el Náhuatl (GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002).

Con respecto a los municipios de Tlaxcala con los que colinda la zona de estudio, se tienen los siguientes datos:

- Para el año 2005, el conjunto de los seis municipios contemplados tiene una población total de 185,155 habitantes, siendo Huamantla, San Pablo del Monte y San Francisco Tetlanohcan donde se concentra la mayor parte de esta población.
- La superficie total de los municipios es 661.49 km<sup>2</sup> por lo que se calcula que hay una densidad de población de 320.54 habitantes por km<sup>2</sup>.
- El promedio de los nacimientos, registrados en el INEGI (2005) (<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aee05/info/pue/mapas.pdf>), son 5,478; mientras que las defunciones para ese mismo año fueron de 766.
- Los municipios con mayor tasa de crecimiento anual para el periodo 2000-2005 son San Pablo del Monte (2.94%), Huamantla (2.62%) y Teolochoico (2.32%).
- La población indígena en el lugar pertenece a dos grupos étnicos: Otomí y Náhuatl.

### **III.3.2. Actividad económica.** Destaca:

- **Agricultura.** El proceso productivo agrícola que tradicionalmente se establece en el área de influencia de La Malinche está basado en el

monocultivo y es principalmente de subsistencia; generalmente se hace bajo condiciones de temporal para producción de grano y pastura para la alimentación del ganado (GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002).

Los municipios poblanos que conforman la zona de interés se caracterizan por la producción de granos como el maíz, frijol, trigo, alverjón y forrajes como avena, alfalfa y cebada; dentro de los productos frutícolas principales encontramos plantaciones de capulín, durazno, manzana y pera, en menor medida se cultiva aguacate, ciruela, chabacano, tejocote, nuez, zapote blanco.

Con respecto a los municipios tlaxcaltecas, se tiene que los cultivos que predominan son el maíz grano, el frijol, haba seca y verde, avena forraje y cultivos perennes como la alfalfa (INAFED, 2005).

- **Ganadería.** Según datos de la SAGARPA, en el periodo 2002-2003, la superficie total dedicada a la ganadería en los cuatro municipios poblanos fue de 16 843 Hectáreas, de las cuáles, 99.7% corresponde a superficie con pastos naturales, arbustos, hierbas y matorrales, tanto nativa del entorno geográfico, como aquellas introducidas por efectos de agentes naturales; sólo 0.3% corresponde a superficie cultivada (pastos, cultivos forrajeros).

Tanto en Puebla como Tlaxcala hay crianza de ganado bovino para carne y leche, porcino, caprino y ovino, incluyendo el asnal y mular, en menor medida ganado equino. En otro tipo de actividades también se crían conejo y algunas aves de corral (INAFED, 2005).

En las comunidades de la montaña, la ganadería caprina representa una actividad de subsistencia y prácticamente la totalidad del ganado es alimentado con pastos de las zonas deforestadas o, como en el caso de Amozoc y San Miguel Canoa, con pastos de zonas arboladas, a las que durante la época de sequía se les prende fuego para esperar el rebrote en las épocas de lluvia (GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002).

-**Silvicultura.** En la actualidad, para algunas comunidades representa una actividad de autoconsumo, a partir de la cual pueden obtener leña de ramas y árboles aislados; para otras comunidades como San Isidro Buen Suceso y San Francisco Tetlanohcan, San Miguel Canoa y Amozoc, continúa siendo



una actividad productiva importante para la obtención de productos maderables tales como tablas, polines, cercas, etc., de hecho, una gran parte de los volúmenes de leña y carbón que se comercializa en las localidades vecinas, no es sino subproductos del aprovechamiento ilegal de árboles en pie. La mayor actividad extractiva se ha desarrollado sobre el bosque de pino-encino, por lo que esta comunidad vegetal se encuentra fuertemente perturbada. Las comunidades locales utilizan los recursos forestales maderables para la fabricación de muebles, cercas y postes y, en el caso del encino, para elaborar carbón vegetal y leña (GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002).

- **Industria.** La estructura industrial de la zona de estudio muestra un proceso inicial de densificación en el que cobran cada vez más importancia la industria metálica básica, la de la química ligera y la de artículos eléctricos, conservando una importancia relevante la industria textil, sobresaliendo las de hilados y tejidos de algodón y lana (INAFED, 2005).

En Tlaxcala, la rama de productos alimenticios y bebidas tiene gran relevancia tanto como la de productos metálicos, productos de madera, la de prendas de vestir; la de productos minerales no metálicos, así como la de productos de papel, sustancias químicas, productos derivados del petróleo y otras industrias manufactureras (INAFED, 2005).

- **Población Económicamente Activa.** Con base al XII Censo General de Población y Vivienda 2000, la población económicamente activa de la zona de estudio es del 46.40 % y el 53.23% corresponde a la población económicamente inactiva, siendo el 0.35% no especificado. Por sectores de actividad, la población se encuentra distribuida de la siguiente forma:

- Sector primario (agricultura, ganadería, caza y pesca): 15.18%
- Sector secundario (minería, petróleo, industria manufacturera, construcción, electricidad): 41.26%
- Sector terciario (comercio, turismo y servicios): 41.53%

La situación para los municipios de San Juan Ixtenco, Huamantla, San Luis Teolocholco, Zitlatepec de Trinidad Sánchez Santos, San Pablo del Monte y San Francisco Tetlanohcan en el estado de Tlaxcala es como sigue:

población económicamente activa 48.75%, población económicamente inactiva 50.88% y 0.35% no especificado. La distribución de las actividades económicas por sector es: sector primario 28.73%, sector secundario 34.99% y sector terciario 33.77%.

## **CAPÍTULO IV**

### ***MATERIAL Y MÉTODOS***

#### **IV.1. Delimitación de la zona de estudio y sus microcuencas hidrográficas.**

El estudio se realizó en la porción del volcán La Malinche, perteneciente al estado de Puebla. La Malinche es una de las Regiones Terrestres Prioritarias de México (RTP-106). Sus coordenadas son Latitud N: 19° 06' 51" a 19° 20' 58" y Longitud W: 97° 55' 10" a 98° 09' 46". El volcán se encuentra ubicado entre los estados de Puebla y Tlaxcala, abarcando los municipios de Acajete, Acuamanala de Miguel Hidalgo, Amozoc, Chiautempan, Huamantla, Ixtenco, Juan Cuamatzi, Papalotla de Xicohténcatl, Puebla, San Pablo del Monte, Santa Cruz Tlaxcala, Tenancingo, Teolochocho, Tepatlaxco de Hidalgo, Tzompantepe, así como Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos. Tiene una superficie de 482 km<sup>2</sup>, y su elevación máxima de 4,460 msnm. Su importancia se debe a los servicios ambientales que presta y a la necesidad de atender el acelerado deterioro de sus ecosistemas. Constituye un ANP decretada en 1938.

Una de las primeras acciones para realizar un estudio es establecer la unidad experimental, que es el objeto o espacio al cual se aplica el tratamiento y donde se mide y analiza la variable que se investiga, en el caso de estudios sobre los recursos naturales de una región, la unidad ideal de investigación es la Cuenca Hidrográfica, es por ello que la unidad experimental en nuestro caso es una microcuenca hidrográfica.

La delimitación de la zona de estudio, así como de la microcuencas que la integran, se hizo mediante la consulta de cartas temáticas editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1995 y 1998) a escala 1:20 000, considerando de la división política del estado de Puebla (INEGI, 2000a). Las microcuencas se trazaron a partir de la identificación de los ríos principales y afluentes importantes, para finalmente dibujar sus parteaguas y seleccionar la microcuenca en la cual se efectuará el estudio de los suelos.

#### **IV.2. Análisis del cambio en los ciclos hidrológico y micro-climático.**

En esta etapa se utilizaron datos de 7 estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua correspondientes a la región circundante de La Malinche, tanto del estado de Puebla como de Tlaxcala, para periodos de tiempo de 1985-1995 y 1995-2005.

El análisis comparativo de precipitaciones y temperaturas medias anuales para los periodos de tiempo estudiados se realizó de la siguiente manera: con la información

obtenida de las estaciones meteorológicas se hizo una base de datos que fue procesada con el programa Surfer versión 8 (Golden Software, Inc., 2002) para elaborar los mapas climáticos de isoyetas e isotermas correspondientes e identificar los cambios en las variables meteorológicas contempladas.

El programa Surfer se basa en el tratamiento de datos distribuidos tanto en el espacio y/o tiempo para la obtención de estimaciones (Kriging) y simulaciones mediante métodos de carácter estocástico (análisis de datos que predice resultados en base a factores probabilísticos). El Kriging es una técnica Geoestadística formulada por el Profesor G. Matheron en la década de 1960 para el tratamiento de información minera, pero que gracias a su robustez ha sido aplicada a diversos ámbitos de las Ciencias de la Tierra, Ciencias del Medio Ambiente, Ecología, Demografía, Economía, Salud, etc. ([http://www.ujaen.es/investiga/tep213/lineas\\_princ.html](http://www.ujaen.es/investiga/tep213/lineas_princ.html)).

**IV.2.1. Elaboración de climogramas para la determinación del régimen de humedad del suelo.** Para poder relacionar la degradación biológica de los suelos con el cambio del ciclo hidrológico y micro-climático, y su contribución al aumento del efecto invernadero, es fundamental determinar el balance hídrico en el suelo, cuya mejor expresión a largo plazo, y que lo relaciona con el cambio en el clima, es el régimen de humedad del suelo (Soil Survey Staff, 1999; Porta *et al.*, 2003).

El balance hídrico representa la valoración del agua del suelo a través del año. Se valora, como en cualquier balance, por los aportes, pérdidas y retenciones.

$$\text{AGUA RETENIDA} = \text{RECIBIDA} - \text{PERDIDA}$$

Agua recibida: precipitaciones atmosféricas y condensaciones.

Agua perdida: evapotranspiración y escorrentía.

Un balance de la humedad del suelo se hace con la información de las estaciones climatológicas, la cual es utilizada en la construcción de climogramas, es decir, representaciones gráficas de la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial ( $E_p$ ), ésta última es evaluada de acuerdo al Segundo Sistema de Thornthwaite (Dirección General de Estudios de Agrología, 1972), utilizando la siguiente fórmula:

$$E_p = 1.6 \times \left( \frac{10 t}{I} \right)^a \times 10 \times F$$

Donde:

Ep: Evapotranspiración potencial para un mes determinado en milímetros (mm)

t: Temperatura media mensual en grados centígrados (° C)

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

I: Índice de calor anual

a: 0.00000067513 - 0.00007712 + 0.0179I + 0.4924

F: Factor de corrección por latitud, los diferentes valores de iluminación influyen en la evapotranspiración

Con los climogramas es posible establecer los balances hídricos y posteriormente definir el régimen de humedad del suelo (Soil Survey Staff, 1999; Porta *et al.*, 2003) y con ello verificar el cambio en la captación de agua por el suelo.

### IV.3 Estimación del área deforestada.

Las áreas cuya deforestación hubiese ocurrido antes de 1986, aquellas que fueron deforestadas en el periodo 1986-2002 y las que en la actualidad (2002 - 2013) conserven vegetación de bosque, se identificaron por medio de imágenes de percepción remota (imagen tomada por el Satélite Landsat, EPA y USGS NALC PATHFINDER, 1986; y Ortofoto en blanco y negro escala 1:20 000, GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002). La información recopilada se digitalizó en el programa ArcView GIS 3.2a del Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI, 2000).

Con base en la superficie deforestada y las microcuencas identificadas, se seleccionó un área de muestreo para hacer el análisis de la emisión de CO<sub>2</sub> en los suelos forestales.

La selección de esta área se hizo con los siguientes criterios y procedimientos:

- Se delimitó dentro de una misma microcuenca, lo que garantizó que a lo largo de esta área hubiera condiciones de clima, topografía, suelo, vegetación y fauna de un mismo sistema natural interrelacionado.
- El área mostró mayores contrastes dentro de la zona de estudio entre los sitios deforestados y los de vegetación forestal.
- Las rutas de acceso a los sitios de posible muestreo son mejores y más numerosas en comparación con otras zonas, lo que facilitó el llegar a los puntos donde se iban a tomar las muestras.

#### **IV.4. Diseño de muestreo y obtención de las muestras de suelo.**

El diseño de muestreo se hizo para seleccionar el número de muestras representativas para el estudio. El diseño consistió en dos aspectos:

- Selección del patrón de muestreo y ubicación de los sitios a muestrear.
- Selección del tipo y tamaño de muestra.

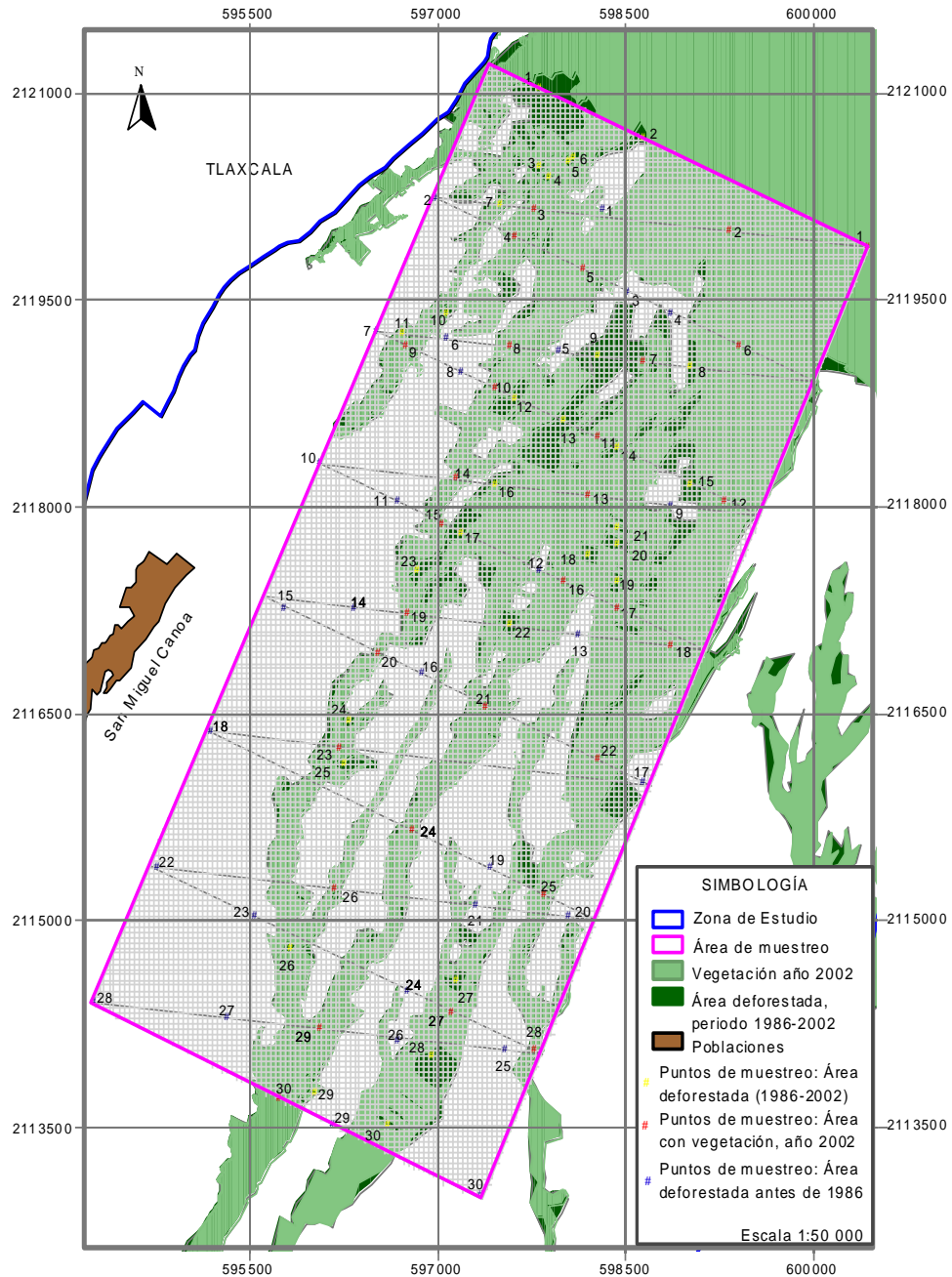
En el muestreo se tomaron en consideración tres bloques de estudio que son: los suelos donde la deforestación ocurrió antes de 1986 (MAL); los suelos que fueron deforestados entre 1986 y 2002 (8MAL) y aquellos suelos que hasta 2013, conservaban vegetación de bosque (0MAL).

En el área de muestreo seleccionada se trazó una red o Grid (de cuadros de 40 metros de lado), donde a los nodos o puntos se les determinaron sus coordenadas UTM, siendo estos los posibles sitios de muestreo. Se trazó además una línea en zigzag tratando de cubrir toda la unidad de muestreo (Figura IV.1), tal como lo recomiendan Castellanos, *et al.*, (2000). En base al grid se escogieron puntos o nodos que hicieran intersección con la línea en zigzag y que por supuesto, fueran representativos para cada uno de los bloques de estudio.

Para el muestreo se tomaron muestras simples. Una muestra simple es un volumen de suelo representativo, que se obtiene con una sola extracción de determinado punto.

Dado que no existen antecedentes en la región estudiada con respecto a la temática de este trabajo, podemos considerarlo como inicial o de reconocimiento, que servirá de base para futuras investigaciones. Por lo tanto en la estimación del tamaño de la muestra para probar diferencia entre las tres medias de los bloques considerados (8MAL, 0MAL, MAL), se estableció como primera aproximación que la magnitud del efecto es moderada ( $\eta^2$ ), fijándosele un valor de 0.20, un nivel de significancia de 0.05 y una potencia de 0.80.

La tabla estadística de Jaccard y Becker (1990) establece un tamaño de muestra de 14 para cada uno de los tres bloques, con  $\alpha = 0.05$ ,  $(1-\beta) = 0.80$  y  $\eta^2 = 0.20$ . Se decidió fijar un tamaño de muestra de  $n=15$  que es lo suficientemente grande para ser representativo en la comparación de las variables experimentales que se medirían después.



**Figura IV.1.** Grid trazado para la localización de los puntos de muestreo.

Se identificó la accesibilidad de los sitios de muestreo previamente seleccionados y georeferenciados. Con una pala se tomaron las muestras a una profundidad de 0 a 15 cm (Manfrinato *et al.*, 2001; Jandl, 2001); cada muestra se depositó en bolsas de

polietileno, se rotuló con la fecha y su clave. Cada muestra de suelo fue de aproximadamente tres kg.

#### **IV.4. Preparación de las muestras.**

Las muestras se colocaron sobre papel limpio y se extendieron manualmente procurando romper los agregados más grandes. Durante 15 días se dejaron secar a la sombra, a temperatura ambiente (Aguilar *et al.*, 1987). Al término de la fase de secado, la materia orgánica macroscópica, las gravas y pequeñas piedrecillas se eliminaron con un tamiz de malla No. 10 (apertura de malla 2 mm). El suelo tamizado se almacenó y etiquetó para su uso posterior (Alcántar *et al.*, 1992).

#### **IV.5. Caracterización física y química de las muestras de suelo.**

En el laboratorio se determinaron las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo con base en el “*Soil Survey Laboratory Methods Manual*” (Burt, 2004) y en la NOM-021-RECNAT (SEMARNAT, 2001), la determinación de densidad aparente se efectuó por la metodología propuesta por la NRCS (1999).

Las propiedades físicas y químicas a determinarse en las muestras de suelo son:

- PROPIEDADES FÍSICAS
  - Densidad aparente
  - Porcentaje de humedad
  - Textura del suelo
  - Color del suelo
- PROPIEDADES QUÍMICAS
  - pH delta ( $\Delta$ pH)
  - Acidez hidrolítica
  - Acidez intercambiable
  - pH en NaF 1:50 (peso:volumen)
  - Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
- CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA ORGÁNICA
  - Contenido de materia orgánica
  - Carbono orgánico
  - Nitrógeno total
  - Relación C/N



Para aumentar la confiabilidad de los resultados, cada uno de los análisis se hizo por duplicado.

**IV.5.1. Densidad aparente.** Para la determinación de la densidad aparente se utilizó el método del cilindro o núcleo (Soil Quality Institute Staff, 1999), con la ayuda de una pequeña tabla y un martillo, se golpeó uniformemente un cilindro de volumen conocido (7.5 cm de diámetro por 6 cm de alto, aproximadamente) hasta quedar enterrado completamente en el suelo; se sacó con cuidado utilizando pala y cuchillo y se eliminó el suelo que sobresalía del cilindro. Las muestras dentro del cilindro se protegieron con tapas rotuladas de papel aluminio, se metieron en bolsas de polietileno y se cerraron perfectamente para evitar pérdidas de humedad y para conservarlas sin disturbar durante su transporte. Ya en el laboratorio, los cilindros con suelo se pesaron, se metieron en una estufa a 105 °C durante 48 h y se volvieron a pesar. El cálculo de densidad aparente se determinó de dividir el peso seco de las muestras entre el volumen del cilindro.

**IV.5.2. Contenido de humedad.** El peso en húmedo y en seco de los cilindros usados para determinar densidad aparente sirvió para el cálculo del porcentaje de humedad de cada muestra. La fórmula que se utilizó fue (Alcántar *et al.*, 1992):

---

Donde:

*Ph*: Peso húmedo de la muestra

*Ps*: Peso seco de la muestra

**IV.5.3. Textura del suelo.** La determinación de la textura del suelo por el procedimiento de Bouyoucos se realizó a través del método AS-09, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

**IV.5.4. Color del suelo.** La determinación del color de un suelo se llevó a cabo mediante el uso de las Tablas de Color Munsell, comparando una muestra de suelo seco con las placas de colores que componen cada una de las cartas de hue disponibles en la tabla; esta comparación se hizo colocando la muestra en la ventana que se encuentra

entre las placas coloreadas, estudiando varias alternativas, hasta que se encontró la placa que coincidió, lo más cerca posible, con el color de cada muestra de suelo. Este mismo procedimiento se realizó con muestras de suelo húmedo.

**IV.5.5. pH y Delta pH ( $\Delta$ pH).** El pH de las muestras se determinó por el método potenciométrico (Potenciometro: Conductronic pH 20) utilizando una relación suelo-agua (ó KCl 1N) de 1:2 (Goijberg y Aguilar, 1987). En un frasco pequeño se pesaron 10 gramos de suelo y se agregaron 20 mL de agua destilada, luego se agitó durante 30 minutos a 150 rpm e inmediatamente después se leyó el pH. Este mismo procedimiento se hizo para una solución de Cloruro de Potasio 1 N.

El  $\Delta$ pH se obtuvo a partir de una simple operación matemática (Uehara y Gillman, 1981):

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$$

**IV.5.6. pH en NaF 1:50 (peso:volumen).** Para poder identificar los suelos como Andosoles o Andisoles, se determinarán las propiedades de: pH en NaF 1:50 (peso:volumen), que se utiliza en Andosoles o Andisoles para detectar la presencia de coloides inorgánicos no cristalinos en el suelo; si el  $\text{pH} > 9.0$ , aquellos coloides están presentes en cantidades mayores a 5% en el suelo (Fieldes y Perrott, 1966).

**IV.5.7. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{1+}$  y  $\text{K}^{1+}$ ).** Las determinaciones de la capacidad de intercambio catiónico y las bases intercambiables del suelo se realizaron a través del método AS-12, con acetato de amonio, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

**IV.5.8. Porcentaje de Materia Orgánica y Carbono Orgánico.** Para determinar el porcentaje de materia orgánica se utilizó el método de Walkley y Black (Walkley y Black, 1934), que es un método para determinar el carbono orgánico contenido en los suelos por combustión húmeda. Por este método se determinó el carbono orgánico fácilmente oxidable, ya que el método está diseñado para oxidar sólo una parte de la materia orgánica, la cual es la parte químicamente activa y a la vez, la más importante para los procesos biológicos. El procedimiento se realizó a través del método AS-07, explicado en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

**IV.5.9. Porcentaje de Nitrógeno Total.** El método usado para esta determinación fue el de Semimicro Kjeldahl (Aguilar *et al.*, 1987). El método implica la conversión de nitrógeno a sulfato ácido de amonio mediante la digestión de suelo con ácido sulfúrico concentrado y calor de 360 °C en presencia de un catalizador. Una vez terminada la digestión, la mezcla se neutraliza agregando solución de hidróxido de sodio y tiosulfato de sodio (NaOH-Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) al 50% y se pone a destilar. El destilado se va depositando en un matraz que contiene ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) al 4% y 5 gotas de indicador mixto; por último, se titula con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02 N.

El porcentaje de nitrógeno total se calcula con la fórmula que aquí se muestra:

---

Donde:

N: Normalidad real del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido

**IV.5.10. Relación Carbono-Nitrógeno (C/N).** La relación C/N se obtuvo de dividir el porcentaje de carbono orgánico entre el porcentaje de nitrógeno total de cada muestra.

#### **IV.6. Extracción y caracterización de los ácidos húmicos del suelo.**

En el laboratorio se efectuó la extracción y caracterización de los ácidos húmicos del suelo.

**IV.6.1. Extracción y fraccionamiento de las sustancias húmicas del suelo.** Se efectuó por el método de Kononova-Be'Ichikova (1960). Las sustancias húmicas se extraen con mezcla de pirofosfato de sodio (22.3 g) e hidróxido de sodio (2.0 g) en 500 mL. El empleo de pirofosfato de sodio, así como de algunas sales neutras de ácidos orgánicos en la extracción de sustancias húmicas del suelo, está basado en las propiedades de dichas sales de formar precipitados no solubles o compuestos solubles de calcio, hierro, aluminio y otros cationes polivalentes, a los que se hayan unidas las sustancias húmicas del suelo. La reacción de la solución de pirofosfato de sodio desempeña un papel importante, ya que al elevarse el pH de 7 a 9.5 aumenta la extracción de las sustancias húmicas.

De esta forma se separaron los ácidos húmicos del resto de las sustancias húmicas del suelo.

**IV.6.2. Determinación de las propiedades ópticas de los ácidos húmicos.** Las propiedades ópticas y, en particular la densidad óptica de las sustancias húmicas, está determinada por su estructura, es decir, que la densidad óptica es directamente proporcional al contenido de radicales orgánicos con dobles enlaces conjugados.

Respectivamente, las densidades ópticas de las soluciones alcalinas de los ácidos húmicos, igualadas en contenido de carbono, caracterizan la proporción entre el carbono de las estructuras y el carbono de los radicales laterales.

En la solución de ácidos húmicos a concentración de  $0.136 \text{ g L}^{-1}$  de carbono, se determinarán los valores de la absorbancia en el espectro de luz visible a las siguientes longitudes de onda: 726, 665, 619, 574, 533, 520, 496, 465 y 450 nm, en un espectrofotómetro Pye Unicam Mod PU 8600 UV/VIS, Con los valores de la absorbancia a 465nm y a 665nm se obtendrá la relación E4/E6 (465/665), que es indicadora del grado de humificación y con los valores a 450 nm y a 520 nm, se obtendrá el índice melánico E4/E5 (450/520).

**IV.6.3. Umbral de coagulación de los ácidos húmicos.** La determinación del umbral de coagulación se efectuó con las mismas soluciones que sirvieron para la caracterización de las propiedades ópticas. Para determinar el umbral de coagulación de los ácidos húmicos en presencia de un electrolito, se utilizará  $\text{CaCl}_2$ ; éste se preparará calculando que la adición del volumen necesario a las muestras tomadas del humato (referido a 1 litro), correspondieran a determinado número de miligramos-equivalentes de  $\text{CaCa}_2$ . De la solución mencionada anteriormente se medirán en tubos de ensaye cantidades de la solución de ácidos húmicos +  $\text{CaCl}_2$  0.02N, se tapanán, se agitarán al mismo tiempo y se dejarán en reposo, en un tiempo determinado (2 horas) se observará y anotará en la bitácora la presencia de turbidez, floculación completa o incompleta, repitiéndose las observaciones a las 4 horas para obtener los resultados definitivos.

#### **IV.7. Aplicación de las pruebas de hipótesis estadísticas.**

Después del análisis de laboratorio, se usaron pruebas de hipótesis estadísticas para comparar las medias de las diferentes características del suelo en los tres bloques de muestras considerados.

Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para probar la hipótesis nula  $H_0: \mu_{8MAL} = \mu_{0MAL} = \mu_{MAL}$  contra la alternativa de que alguna de las medias es diferente. Este análisis de varianza tiene una clasificación donde el factor (tipo de suelo) tiene tres niveles o bloques:

Nivel 0MAL: Sitios con vegetación forestal en la actualidad (2002-2013)

Nivel 8MAL: Sitios deforestados entre 1986 y 2002

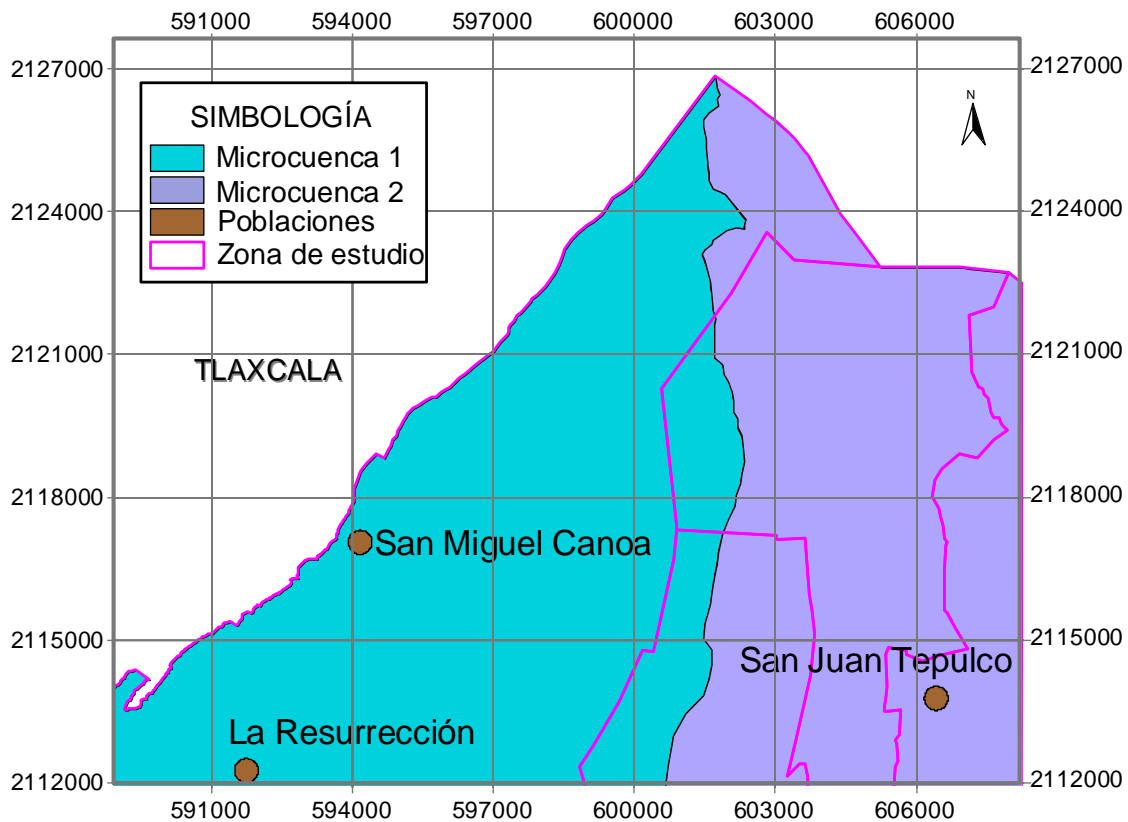
Nivel MAL: Sitios deforestados antes de 1986

Se utilizó el programa MINITAB 14 (2003) y se consideró un nivel de significancia de un 5%. En los casos en que se rechazó la hipótesis de nulidad, se calcularon los intervalos de confianza individuales para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher, esto es, se calculó la Mínima Diferencia Significativa (MDS) para todas las comparaciones por pares y la hipótesis nula  $H_0: \mu_i = \mu_j$  se rechaza si el cero cae fuera del intervalo de confianza al 95 % (Kuehl, 2001).

## CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### V.1. Delimitación de la zona de estudio y sus microcuencas hidrográficas.

Se identificaron dos microcuencas, ambas pertenecientes a la subcuenca del río Atoyac, que a la vez pertenece a la gran cuenca del Balsas (Figura V.1).



**Figura V.1** Microcuencas identificadas en la zona de estudio.

Las cuencas hidrográficas y sus subunidades, las microcuencas, son depresiones, en la superficie terrestre, de forma y origen diversos (Gómez-Tagle, 2002). Pueden ser exorreicas como las identificadas en este trabajo (con un desagüe que permite que las aguas circulen y sean expulsadas de la cuenca) y endorreicas (sin desagüe). Independientemente de sus dimensiones y profundidad, pueden estar ocupadas por el agua (lagos, mares). Hay cuencas originadas por la erosión, entre las que se reconocen las glaciáricas y las erosivo-fluviales.

Debido a que las cuencas hidrográficas son unidades naturales que contienen un cúmulo de recursos que interactúan como un sistema, sus entradas y salidas de agua y/o energía dependen de los componentes naturales como clima, topografía, suelo, vegetación, fauna y los componentes no naturales como de uso del suelo y el desarrollo de la comunidad humana, estas son las unidades naturales para reconocer un ecosistema.

Las microcuencas identificadas son una porción de la tierra firme con un sistema de laderas y corrientes fluviales. Están delimitadas por divisorias o “parteaguas” desde las cuales escurren aguas superficiales o subterráneas hacia un río o barranca principal. Sus cabeceras presentan un canal con afluentes pequeños, las porciones deprimidas están rellenas de sedimentos de origen volcánico. Se trata de cuencas volcánico-erosivas, por lo que son depresiones formadas originalmente por procesos volcánicos que fueron posteriormente modeladas por procesos exógenos.

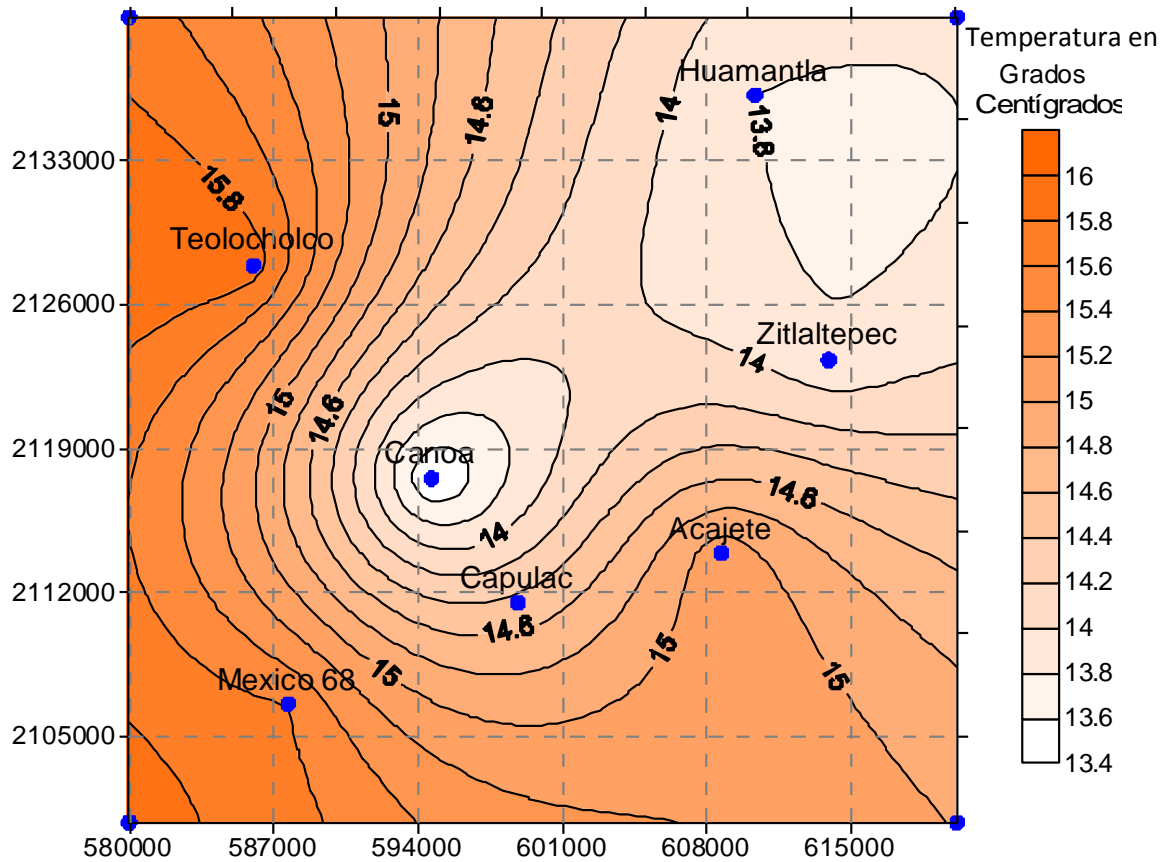
La delimitación de las microcuencas como unidad de estudio en este trabajo, fue importante para garantizar condiciones medioambientales homogéneas a lo largo de la zona que posteriormente se escogería para el muestreo.

## **V.2. Análisis del cambio en los ciclos hidrológico y micro-climático.**

La degradación biológica del suelo en áreas deforestadas de región de La Malinche ha provocado un cambio en los patrones de precipitación y un aumento en la temperatura promedio anual durante el periodo de 1995 a 2005 en comparación con el de 1985 a 1995.

Comparando las gráficas de temperatura de las figuras VI.2. y VI.3, hay una tendencia general al aumento de temperatura en las zonas aledañas a la región de La Malinche en el periodo de 1995 a 2005, sólo el municipio de Acajete muestra un comportamiento contrario y el municipio de San Luis Teolocholco, Tlaxcala, permanece con 15.9°C en los dos periodos de estudio. La temperatura aumento en promedio 0.8°C y es en la localidad de San Miguel Canoa donde hay un cambio mayor de temperatura (2.3°C).

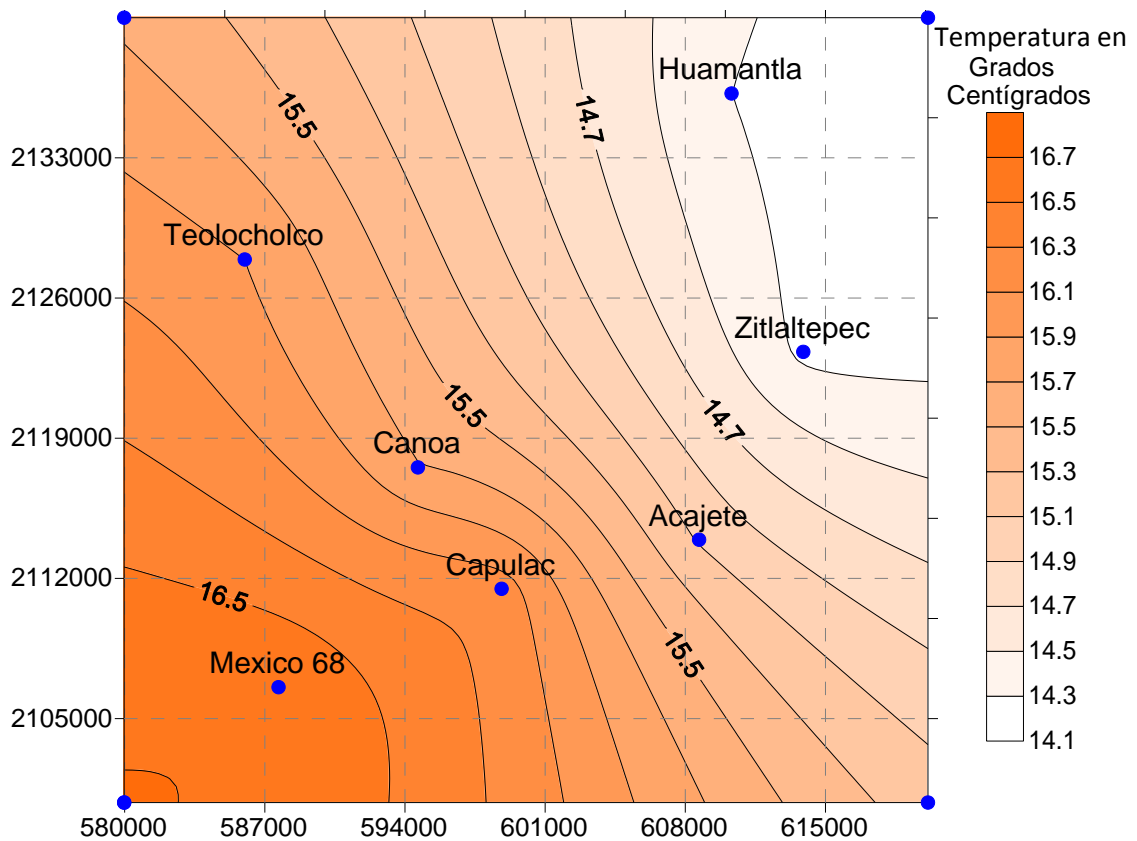
El promedio de temperaturas para 1985-1995 fue de 14.61°C y 15.45°C para el periodo entre 1995 y 2005.



**Figura V.2.** Isotermas del periodo 1985-1995 en la región de La Malinche.

En la figura V.2 (periodo entre 1985 y 1995) se puede observar que las temperaturas más altas se concentraban en el noroeste y suroeste de la región de La Malinche, donde se sitúa el municipio de Puebla y el de San Luis Teolochocho, Taxcala. En el mapa de isothermas se aprecia que en el municipio de Puebla (representado por los datos de la estación meteorológica *México 68*) se tiene una temperatura media anual de 15.6°C; es decir, la más alta en comparación con los municipios aledaños. Las temperaturas medias anuales más bajas se sitúan en los municipios de Huamantla (Tlaxcala), Concepción Capulac (Puebla) y Zitlaltepec de Trinidad Santos Sánchez (Tlaxcala).





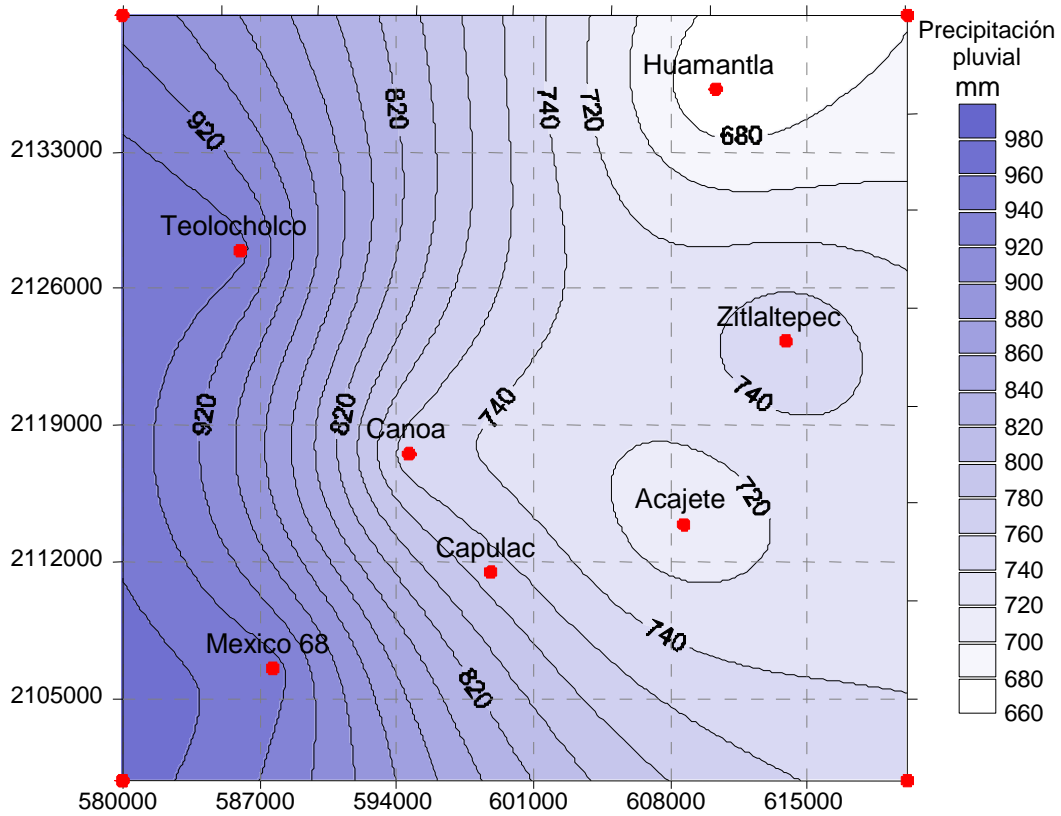
**Figura V.3.** Isotermas del periodo 1995-2005 en la región de La Malinche.

En el periodo comprendido entre 1995 y 2005 (Figura V.3) se muestra la misma tendencia, pero ahora la temperatura media anual en el municipio de Puebla es de 16.6°C (1.07°C mayor). Las temperaturas menores se registraron en los municipios de Huamantla (14.3°C) y Zitlaltepec de Trinidad Santos Sánchez (14.2°C); aún así, en estas poblaciones la temperatura promedio aumentó 0.5°C y 0.4°C respectivamente.

En el cuadro VI.I presenta con mayor detalle los datos anteriormente mencionados.

Con respecto a la precipitación (Figuras V.4 y V.5), en ambos periodos de estudio, las precipitaciones medias anuales permanecieron más o menos constantes (790 mm). El análisis por población muestra otra situación. Hay tres municipios (San Luis Teolocholco, Puebla y Huamantla) donde hubo una disminución en la precipitación media anual; de estos tres municipios el más afectado por el fenómeno es el de San Luis Teolocholco, con una disminución en la precipitación media anual de 67.7 mm; le sigue el municipio de Puebla con una disminución de 65.71 mm y finalmente Huamantla con disminución de

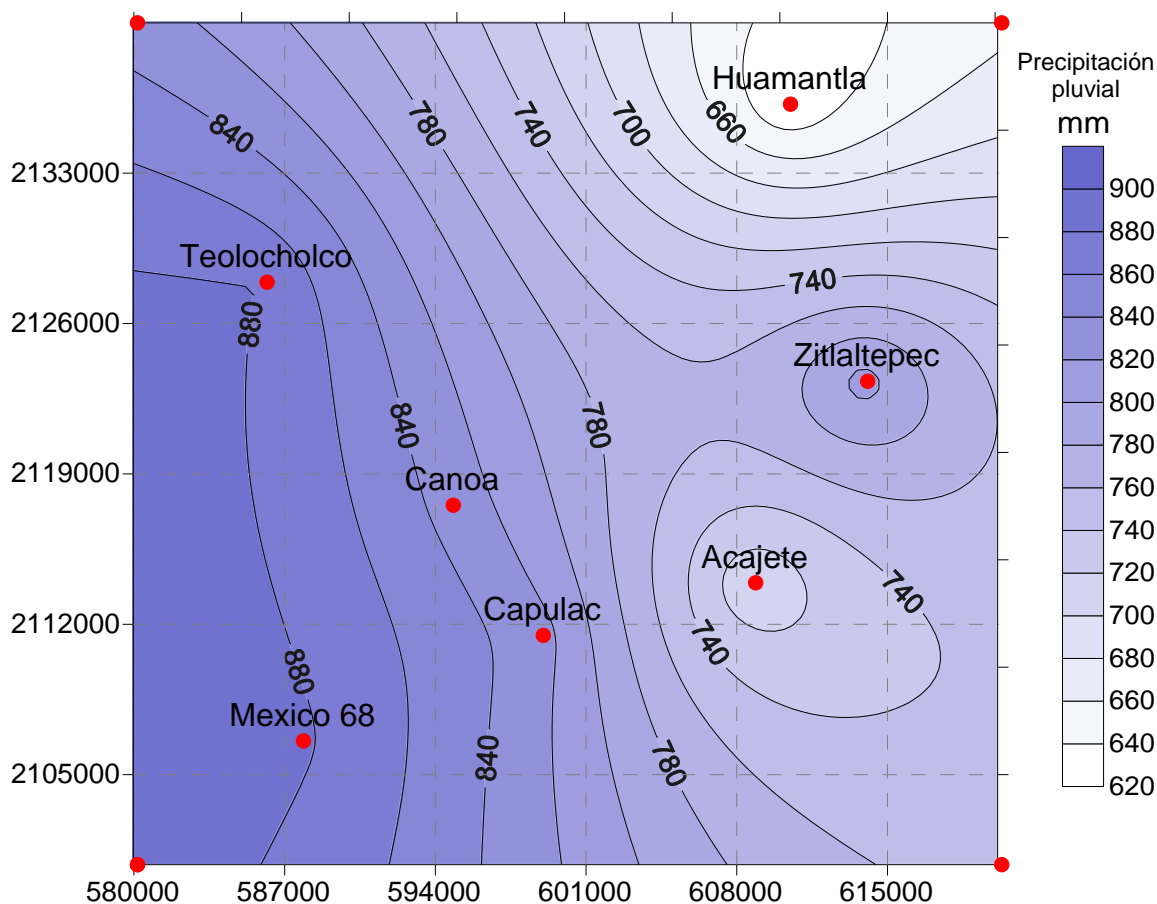
38.4 mm. Acajete presenta una precipitación constante, sólo hay una disminución de 0.05 mm para el periodo de 1995 a 2005.



**Figura V.4.** Isoyetas del periodo 1985-1995 en la región de La Malinche

Las otras tres poblaciones presentan patrones contrarios: hay un aumento en la precipitación promedio (Cuadro V.2), de manera que no se podría definir una tendencia al aumento o disminución de la precipitación a nivel regional. Este comportamiento evidencia el cambio climático que se está experimentando en la región.

Como conclusión, se puede destacar que los municipios en los que cambiaron los patrones de temperatura y precipitación son: San Luis Teolochocho y Puebla (especialmente en la comunidad de San Miguel Canoa).



**Figura V.5.** Isoyetas del periodo 1995-2005 en la región de La Malinche.

**Cuadro V.1.** Variación de la temperatura media en la región de La Malinche durante los periodos 1985-1995 y 1995-2005.

Estación Meteorológica	Temperatura por periodo (°C)		Variación (°C)
	1985-1995	1995-2005	
Canoa (Puebla)	13.39	15.71	+2.32
Acajete	15.13	15.08	-0.05
Capulac (Amozoc)	14.60	16.20	+1.60
Mexico 68 (Puebla)	15.60	16.67	+1.07
Zitlaltepec	13.84	14.26	+0.42
Huamantla	13.80	14.30	+0.50
Teolocholco	15.90	15.90	0.00
Promedio	14.61	15.45	+0.84

**V.2.1. Balance hídrico y régimen de humedad.** El comportamiento hidroclimático en el sitio donde se encuentra una estación climatológica puede establecerse a partir de la relación entre las entradas (precipitación) y las salidas de agua del sistema (evaporación, consumo hídrico de la vegetación, escorrentía) (Pascual, 2002), donde el suelo está implicado en el sentido de que el agua cumple parte de su ciclo pasando por las interfaces atmósfera-suelo-vegetación. A este tipo de simulación se le denomina balance hídrico (Seóñez, 1999). Por medio de la aplicación del modelo de balance hídrico se establece una relación entre los cambios de uso y el régimen de humedad de los suelos.

La determinación de balance hídrico se ha utilizado en el espacio estacional para los requerimientos de irrigación y del umbral mínimo de humedad del suelo por debajo del cual las plantas no pueden sobrevivir. También se ha manejado para la evaluación de los efectos hidrológicos debidos al cambio climático o los cambios en la cubierta vegetal, etc.

La humedad del suelo está condicionada por diferentes factores y la vegetación que soportan es uno de ellos. La vegetación constituye un elemento decisivo del ciclo hidrológico, incluso en medios áridos y semiáridos, porque está relacionada estrechamente tanto con la evaporación como con la infiltración y la escorrentía.

**Cuadro V.2.** Variación de la precipitación media en la región de La Malinche para los periodos 1985-1995 y 1995-2005.

Estación Meteorológica	Precipitación por periodo (mm)		Variación (mm)
	1985-1995	1995-2005	
Canoa (Puebla)	746.68	832.70	+86.02
Acajete	702.45	702.40	-00.05
Capulac (Amozoc)	770.00	829.01	+59.01
Mexico 68 (Puebla)	948.95	883.24	-65.71
Zitlaltepec	760.26	807.93	+47.67
Huamantla	660.20	621.80	-38.40
Teolocholco	946.80	879.10	-67.70
Promedio	790.76	793.74	+02.98

La vegetación almacena cantidades importantes de ésta como parte indispensable para el cumplimiento de sus funciones vitales. Por otro lado, la vegetación, especialmente la cubierta forestal, es participante en la recarga hídrica de los suelos, porque interviene directamente sobre la tasa de agua que se precipita en la superficie del suelo y por ende sobre la infiltración ocurrida en éste, sobre la redistribución de la humedad en el mismo y en las pérdidas por evapotranspiración (que es la evaporación directa del agua del suelo más su pérdida por la transpiración de las plantas).

Las intervenciones antrópicas (como la deforestación, la urbanización, los incendios, la intensificación de los usos de suelo) en el uso del suelo, modelan el paisaje y alteran la dinámica del ciclo hidrológico, puesto que afectan los componentes del sistema (Pascual, 2002).

En la región de La Malinche, con base en la elaboración de los climogramas fue posible establecer los balances hídricos y posteriormente definir el régimen de humedad del suelo para los periodos de tiempo 1985-1995 y 1995-2005 (Figuras de la V.6 a la V.13).

Los resultados del análisis de los climogramas que se hicieron para cada estación meteorológica dieron como resultado que el régimen de humedad de suelo en la región es el Ústico para los dos periodos de estudio, es decir, no cambió.

El régimen Ústico se caracteriza porque la precipitación ocurre en verano y el suelo tiene agua disponible para la planta por 90 días consecutivos o más; o por 180 y hasta 270 días acumulativos por año, lo que significa que el suelo dispone de agua en el período de crecimiento de las plantas, pero en invierno y a finales de verano puede haber una cantidad limitada de agua.

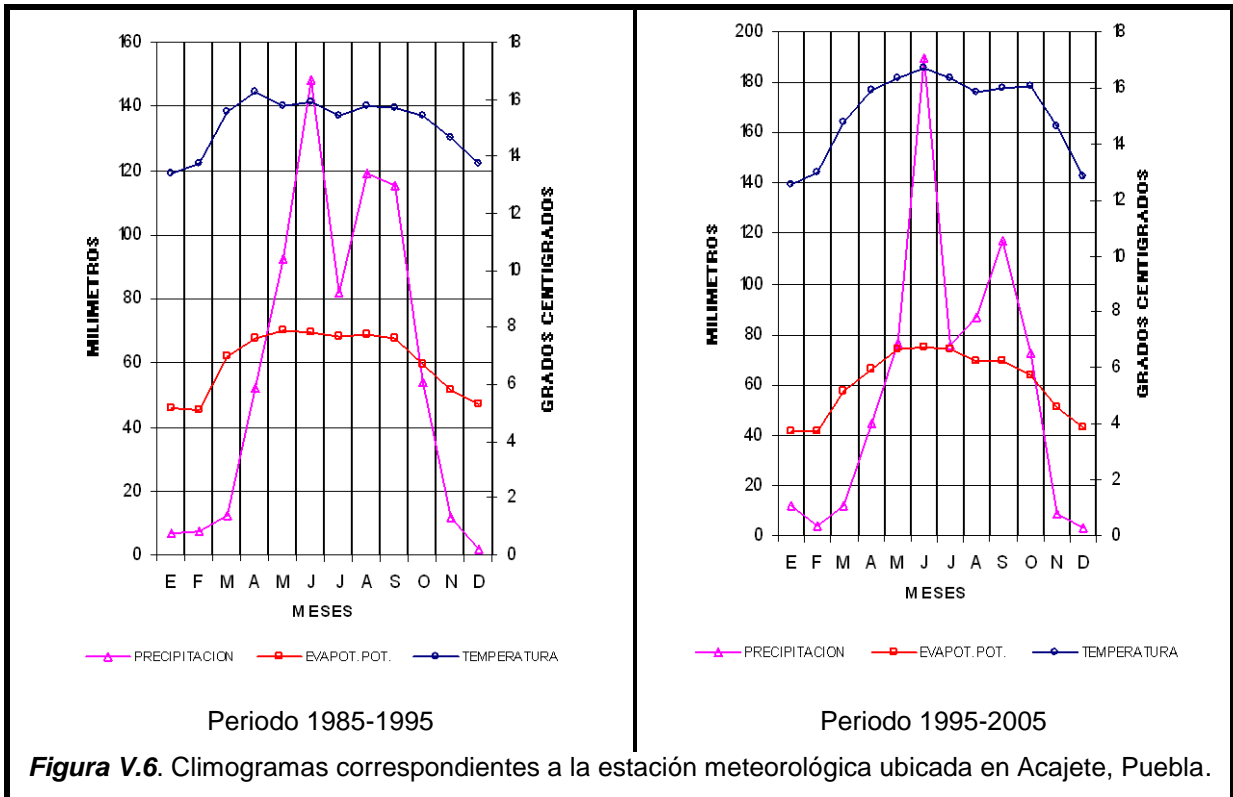


Figura V.6. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en Acajete, Puebla.

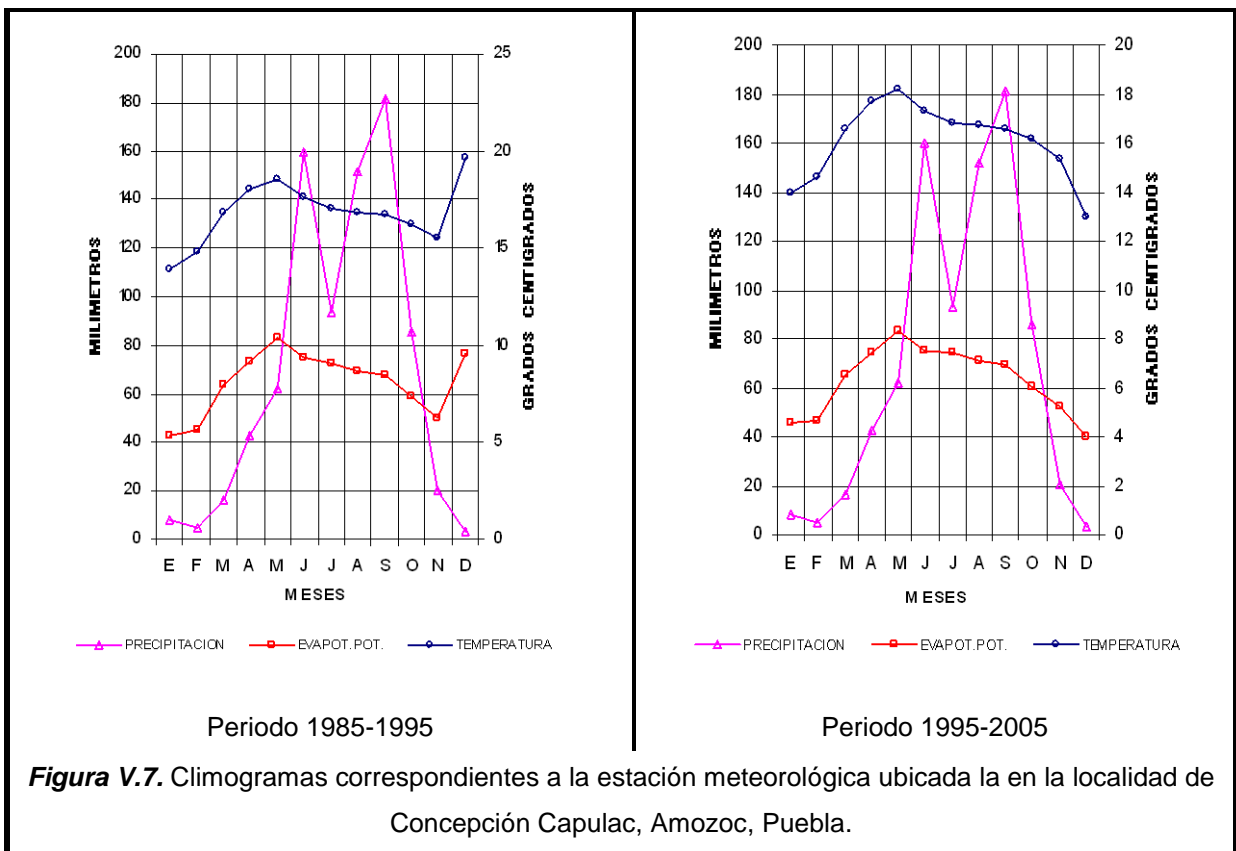
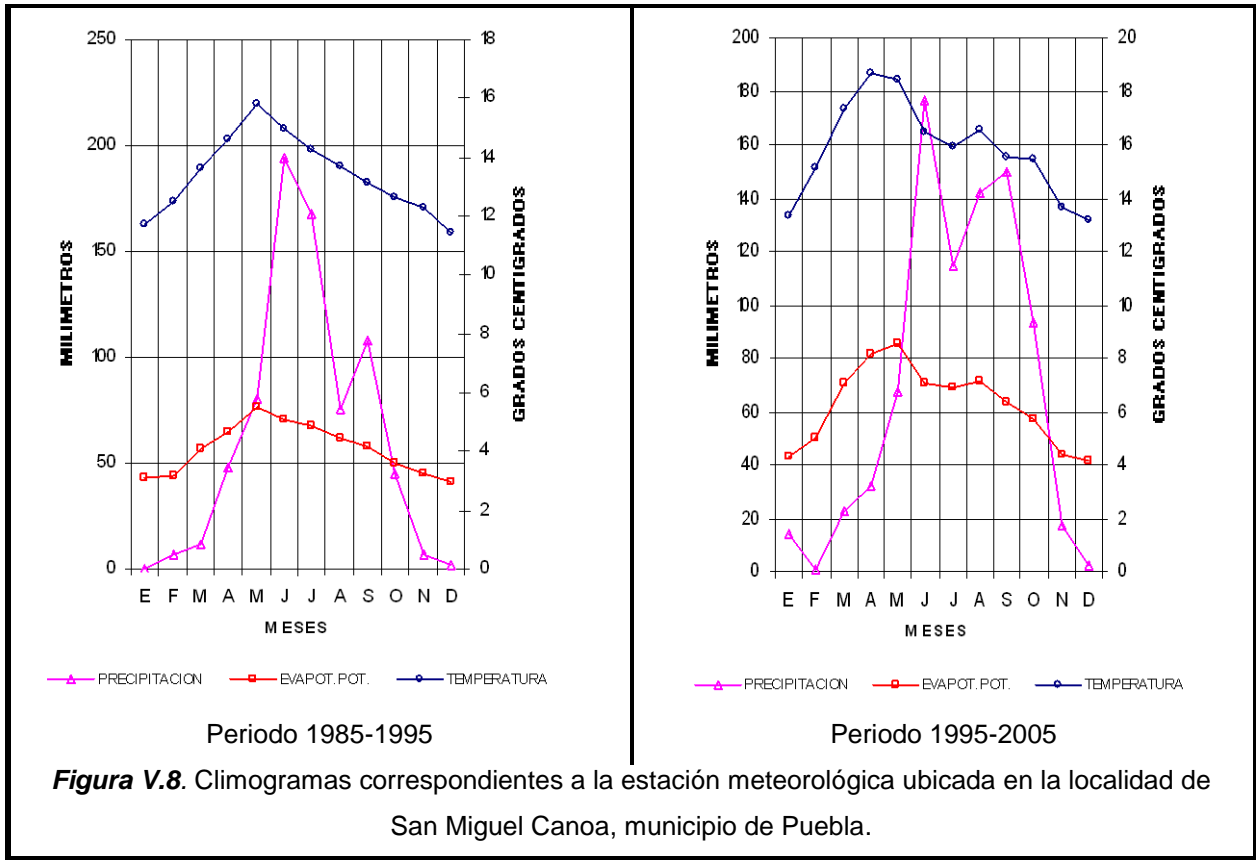
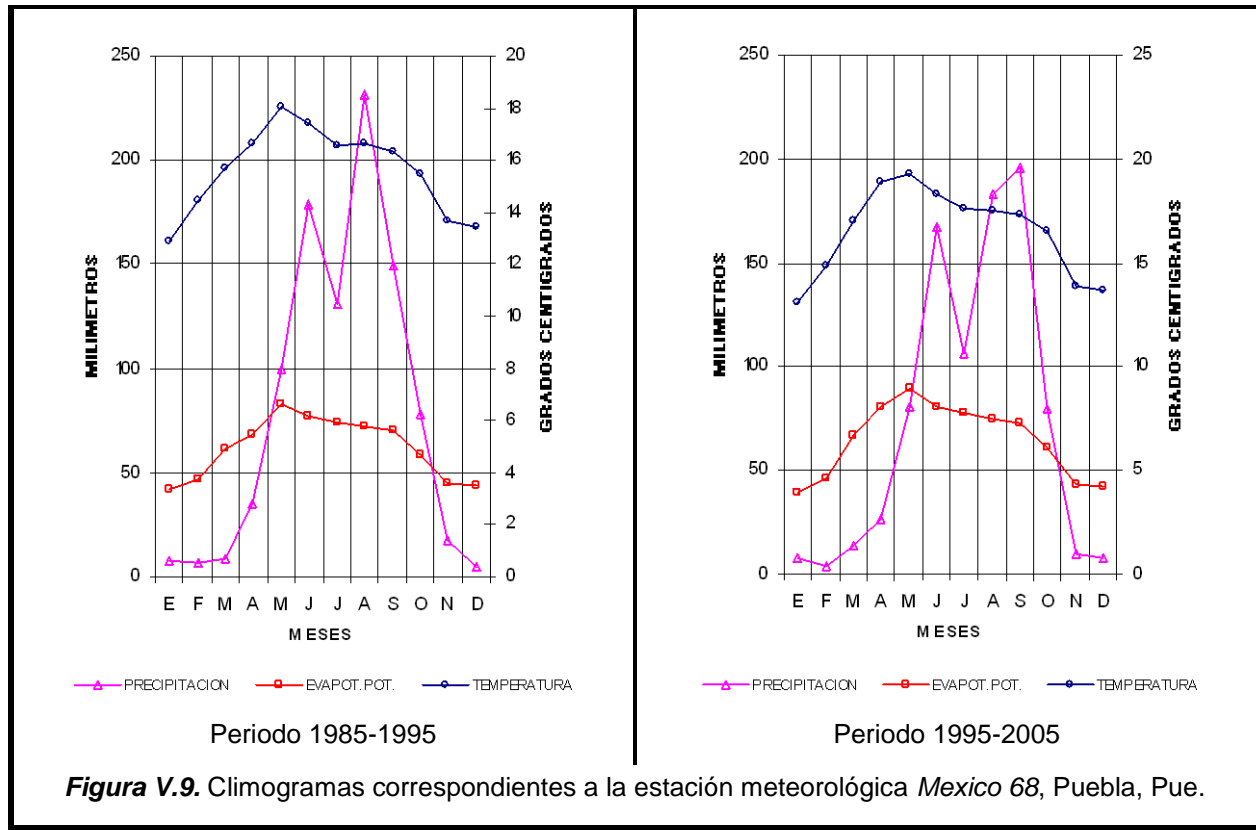


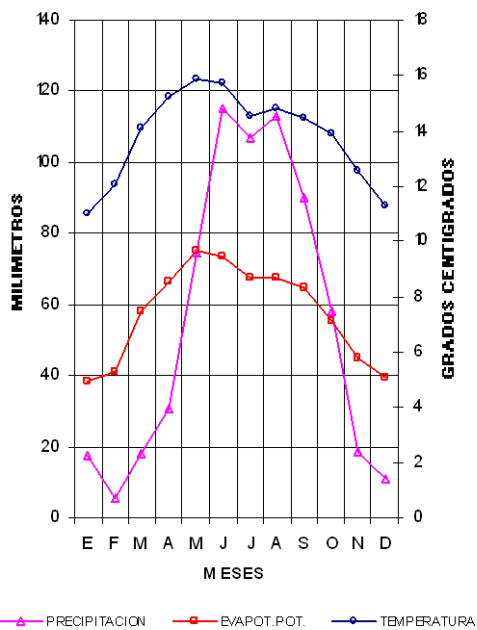
Figura V.7. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en la localidad de Concepción Capulac, Amozoc, Puebla.



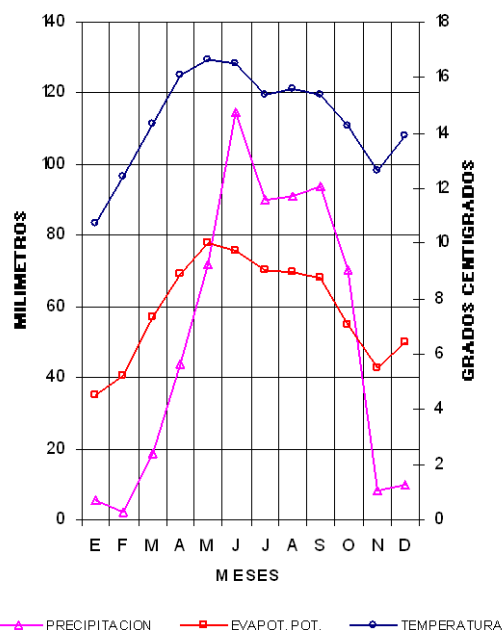
**Figura V.8.** Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en la localidad de San Miguel Canoa, municipio de Puebla.



**Figura V.9.** Climogramas correspondientes a la estación meteorológica Mexico 68, Puebla, Pue.

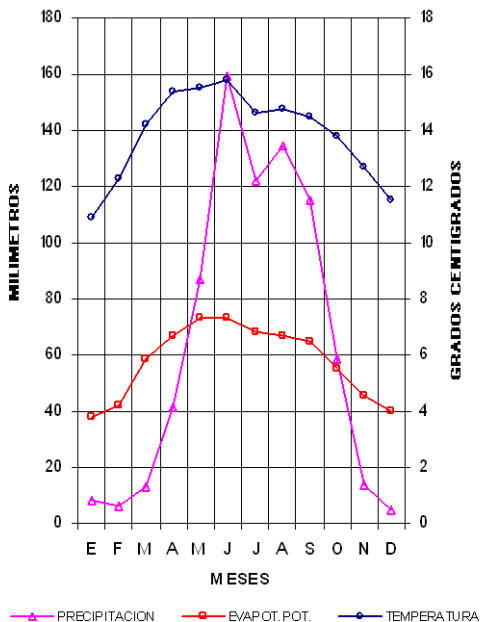


Periodo 1985-1995

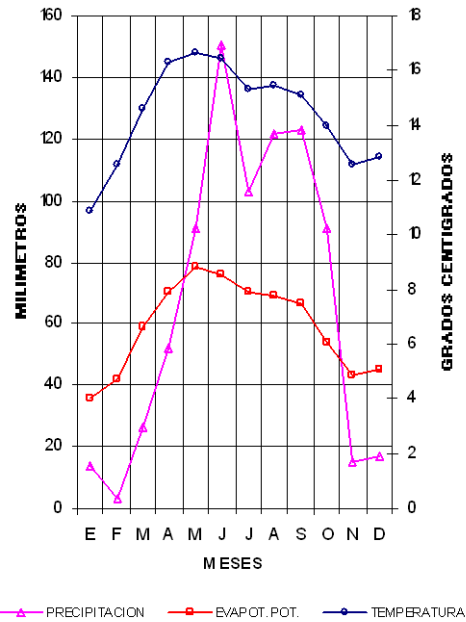


Periodo 1995-2005

Figura V.10. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada el municipio de Huamantla, Tlax.



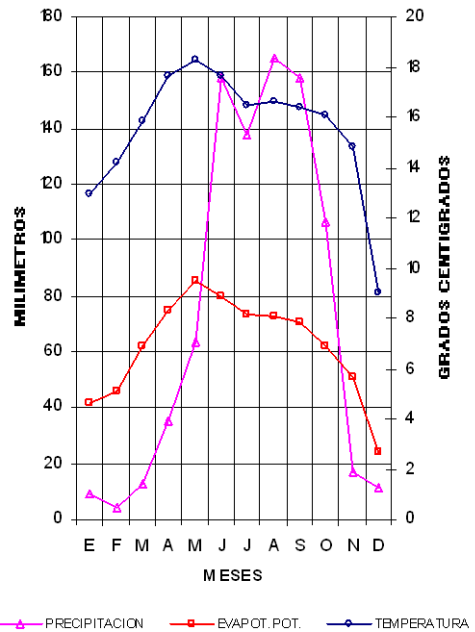
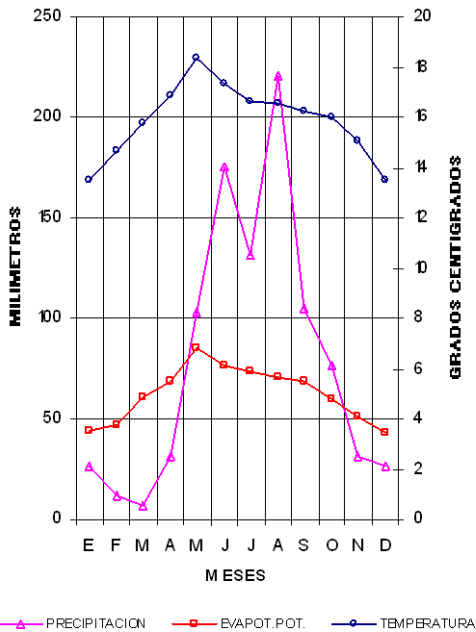
Periodo 1985-1995



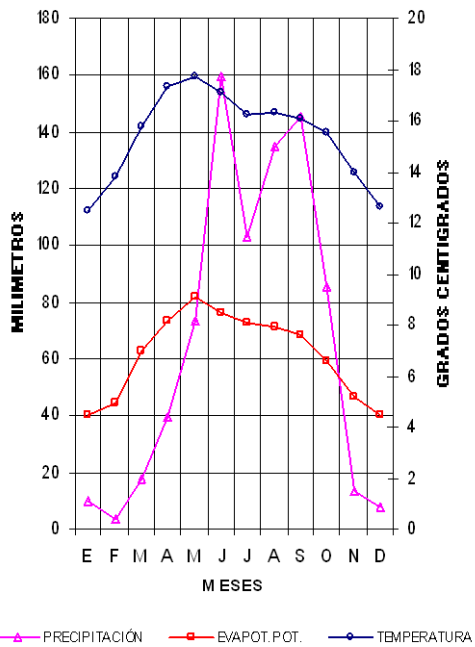
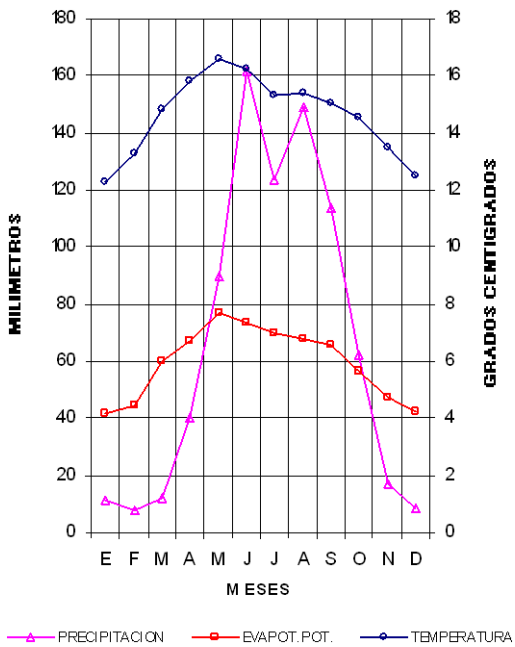
Periodo 1995-2005

Figura V.11. Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en el municipio de Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos, Tlax.





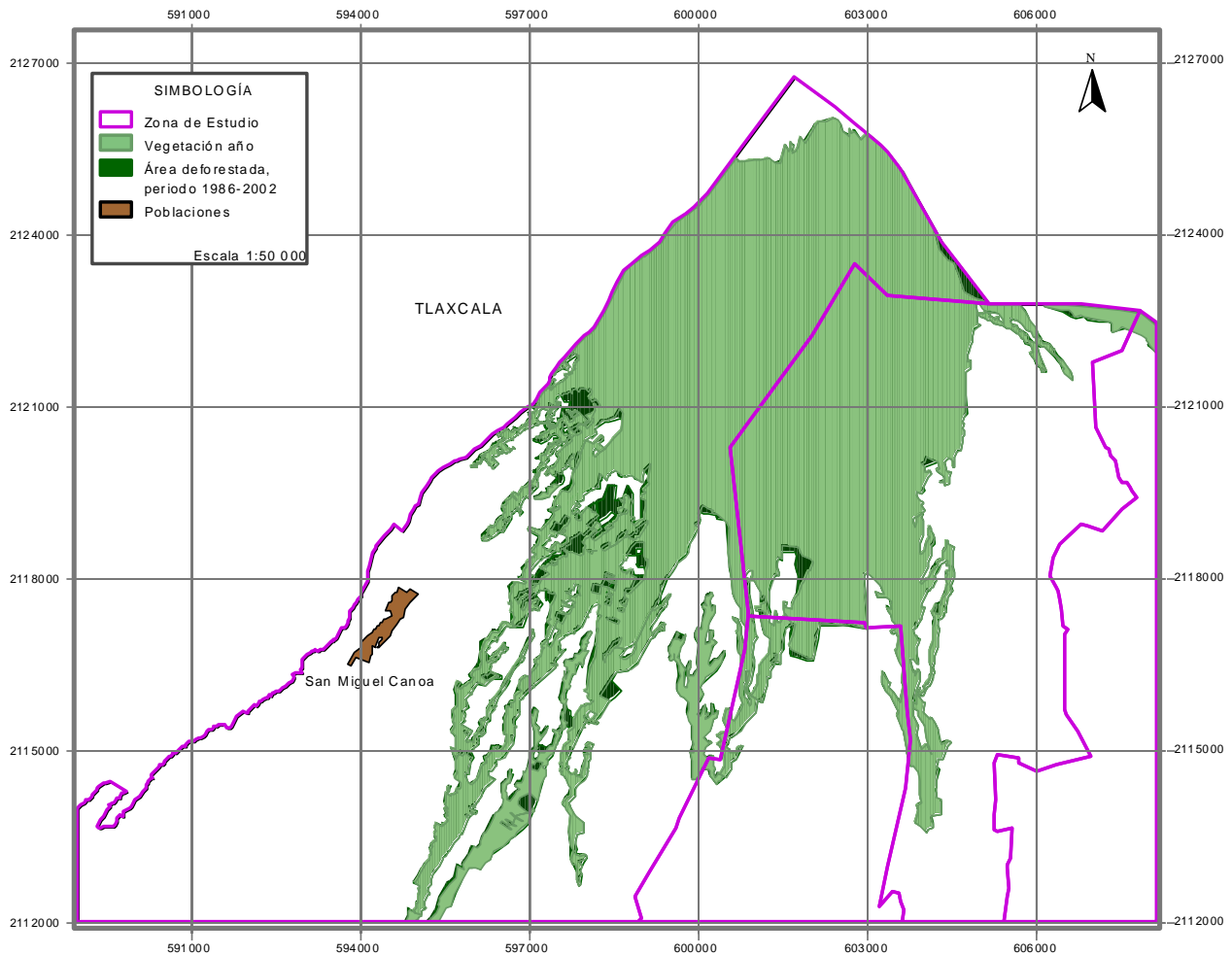
Periodo 1985-1995  
 Periodo 1995-2005  
**Figura V.12.** Climogramas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en el municipio de San Luis Teolocholco, Tlax.



Periodo 1985-1995  
 Periodo 1995-2005  
**Figura V.13.** Climogramas generales obtenidos para la región de La Malinche.

### V.3. Evaluación de la deforestación en la zona de estudio.

Con base en la imagen tomada el 17 de abril de 1986 por el Satélite Landsat y la Ortofoto contenida en el Programa Integral de Manejo del Parque Nacional la Malinche (GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA, 2002), se estimó mediante técnicas cartográficas, que hubo una reducción de la superficie boscosa de 5,934 a 5,650 ha entre los años 1986 y 2002 (Figura V.14), lo que significa que hubo una pérdida de superficie forestal de 284 ha (2.84 km<sup>2</sup>), de las cuales, poco más de 191 ha se encuentran en el municipio de Puebla. La reducción anual de bosque fue de 17.75 ha, es decir, la tasa de deforestación porcentual fue de 0.3% anual. Esta tasa es 0.5 y 1.7 % menor que el rango de tasas de deforestación registrado en el último inventario forestal nacional; sin embargo es comparable con la promedio existente a nivel mundial (0.2%).



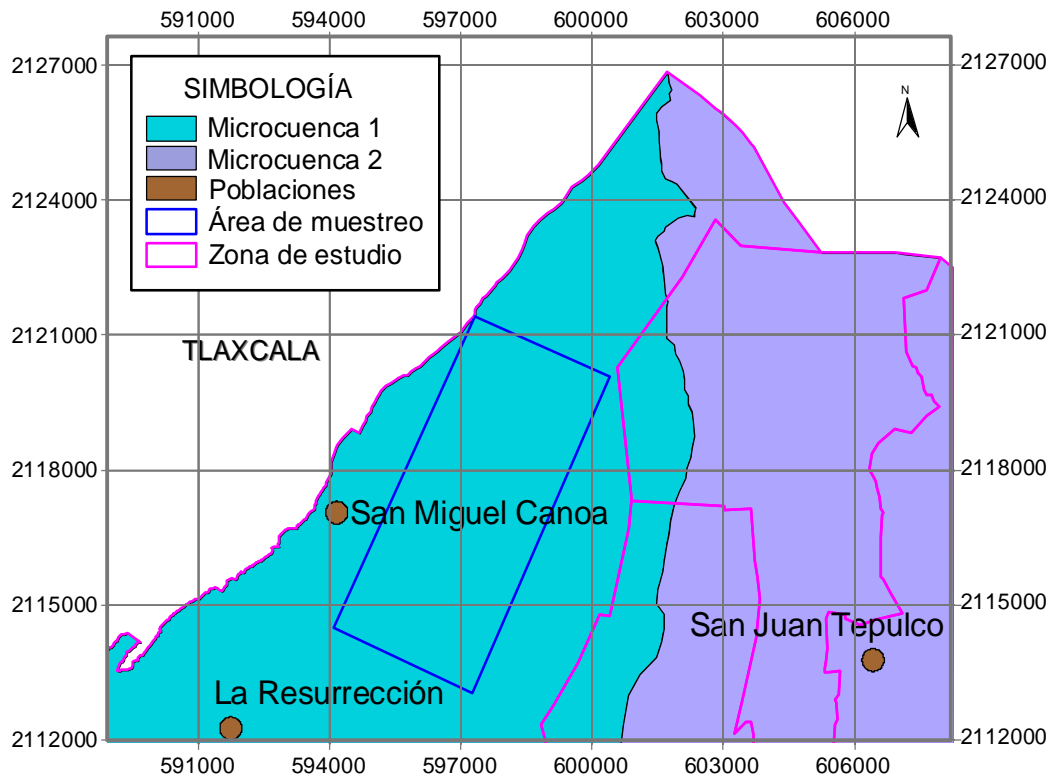
**Figura V.14.** Área deforestada en el periodo 1986-2002, La Malinche, estado de Puebla.

#### V.4. Diseño y localización de los puntos de muestreo

El diseño de muestreo se estableció en un área específica de la zona estudiada que cumpliera con el criterio de contener sitios: cuya deforestación hubiese ocurrido antes de 1986 (MAL), que fueron deforestados entre 1986 y 2002 (8MAL), que en la actualidad (2002 - 2012) conserven vegetación de bosque (0MAL).

Con ayuda del programa Surfer 8 se trazó una red o Grid, donde a los nodos o puntos se les determinaron sus coordenadas UTM, ubicando así los posibles sitios de muestreo.

Los sitios de muestreo corresponden exclusivamente al municipio de Puebla que se encuentran en la microcuenca número 1. Está área, además su relativa cercanía a la ciudad y de que cuenta con muchas rutas de acceso, contiene de forma representativa a los tres diferentes bloques de sitios en estudio (MAL, 8MAL, 0MAL), mostrando un equilibrio entre el área deforestada y la no deforestada. Esta área tiene 25.45 km<sup>2</sup> (2,545 ha) (Figura V.15).



**Figura V.15.** Localización del área de muestreo

El número de muestras calculado tomando en cuenta el diseño experimental fue de 15 muestras simples por cada bloque de sitio en estudio, por lo que el total de muestras fue de 45. Anticipando que algunos puntos a muestrear pudieran ser inaccesibles, se eligieron 15 puntos más por cada bloque.

En la figura V.16 se señala cada uno de los puntos seleccionados antes del inicio del muestreo, y la figura V.17 muestra los puntos de muestreo que se tomaron finalmente y su asociación con las unidades de suelo (Figura V.18).

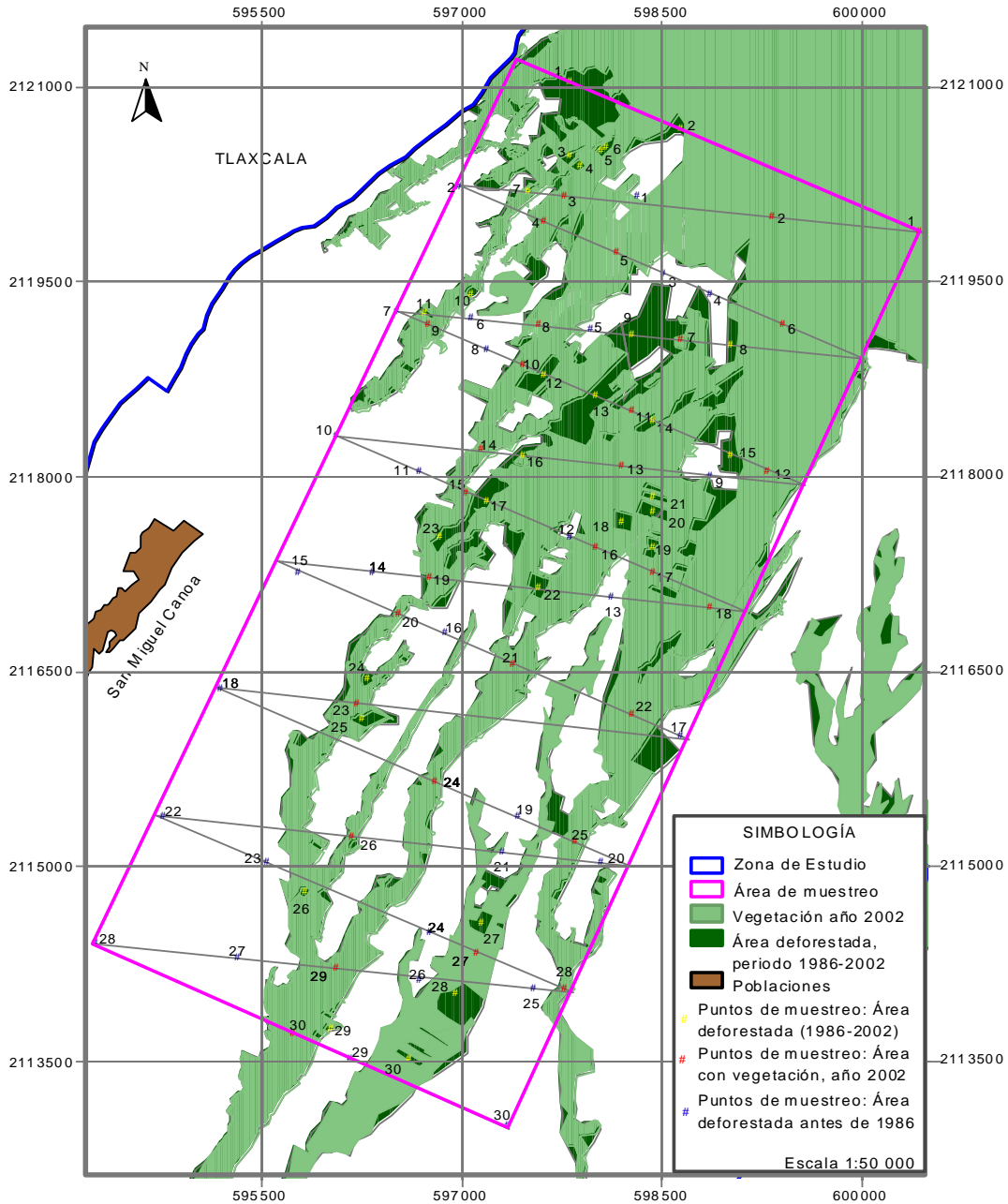


Figura V.16. Puntos programados al inicio del muestreo.

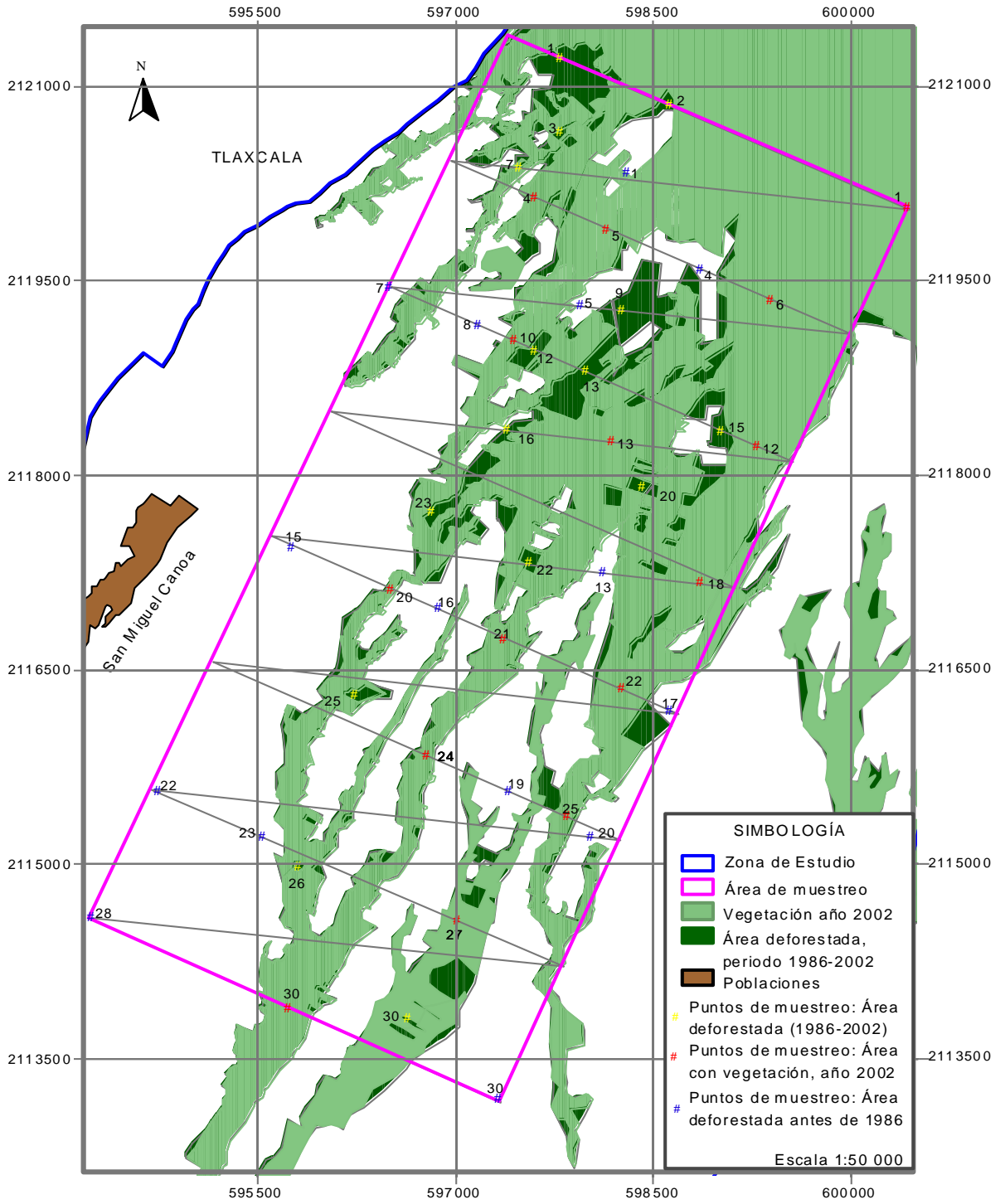


Figura V.17. Puntos de muestreo realizados.

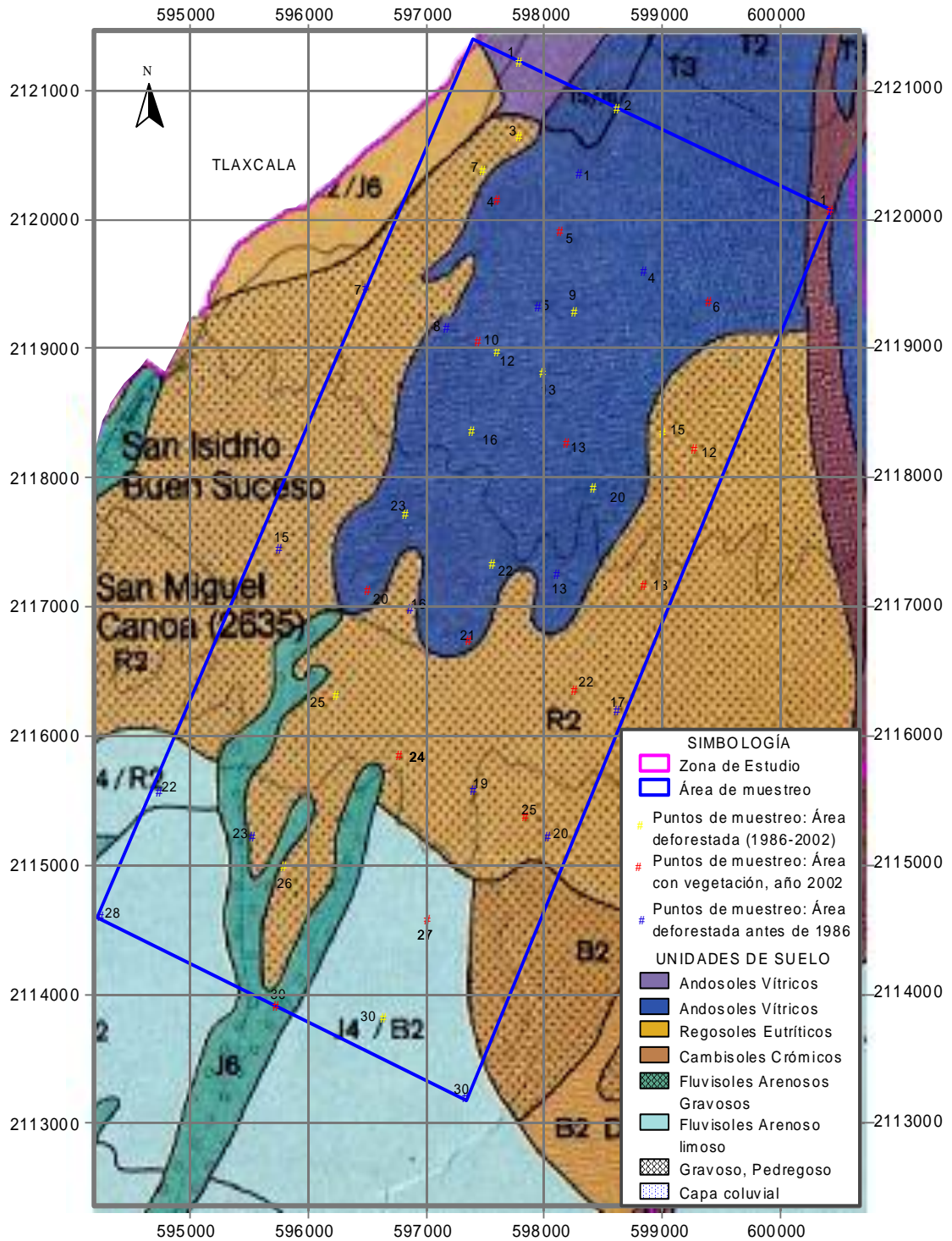


Figura V.18. Puntos de muestreo y unidades de suelo.

### V.5. Propiedades físicas y químicas de los suelos.

Las 45 muestras de suelo obtenidas de la región de La Malinche (Cuadro V.3), fueron mantenidas en frascos de plástico a temperatura ambiente para su posterior análisis, y fueron nombradas de acuerdo a los períodos de deforestación de la zona de estudio, así como a la parte de suelo que conservó su vegetación hasta el año 2012, como se indica a continuación:

- Suelo deforestado antes de 1986 : clave (MAL)
- Suelo deforestado entre 1986 y 2002: clave (8MAL)
- Suelo que conservó su vegetación de 2002 a 2012: clave (0MAL)

**Cuadro V.3.** Claves utilizadas para nombrar a los suelos de la región estudiada.

<b>MUESTRAS DE SUELO DE LA REGIÓN DE LA MALINCHE</b>		
<b>MAL</b>	<b>8MAL</b>	<b>0MAL</b>
MAL01	8MAL01-1	0MAL01-1
MAL04	8MAL02	0MAL04
MAL05	8MAL03	0MAL05
MAL07	8MAL07	0MAL06
MAL08	8MAL09	0MAL10
MAL13	8MAL12	0MAL12
MAL15	8MAL13	0MAL13
MAL16-1	8MAL15	0MAL18
MAL17	8MAL16-1	0MAL20
MAL19	8MAL20	0MAL21
MAL20	8MAL22	0MAL22
MAL22	8MAL23	0MAL24
MAL23	8MAL25	0MAL25
MAL28	8MAL26	0MAL27-1
MAL30	8MAL30-1	0MAL30

**V.5.1. Análisis Físico y Químico del suelo.** Las muestras de suelo de la región de La Malinche fueron caracterizadas, considerando las siguientes propiedades:

- PROPIEDADES FÍSICAS
  - Densidad aparente
  - Porcentaje de humedad
  - Textura del suelo
  - Color del suelo
  
- PROPIEDADES QUÍMICAS
  - Acidez hidrolítica
  - Acidez intercambiable
  - pH en NaF 1:50 (peso : volumen)
  - pH delta ( $\Delta$ pH)
  - Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
  - Bases intercambiables
  
- CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA ORGÁNICA
  - Contenido de materia orgánica
  - Carbono orgánico
  - Nitrógeno total
  - Relación C/N
  - Extracción y fraccionamiento de las sustancias húmicas del suelo
  - Grado de humificación
  - Índice melánico
  - Umbral de coagulación

Un enfoque ecológico del suelo reconoce las interacciones suelo-ser humano; de esta forma, la calidad del suelo es inseparable del concepto de sostenibilidad o sustentabilidad del sistema y se considera un indicador clave del estado del ecosistema. Acton y Gregorich (1995) consideran que la calidad del suelo determina la sostenibilidad agrícola y forestal, la calidad del ambiente y, como consecuencia de lo anterior, la salud de las plantas, de los animales y del ser humano. La calidad del suelo depende de manera fundamental de sus propiedades físicas y químicas y los primeros esfuerzos



científicos reconocieron la importancia de clasificar el suelo y de considerar, con respecto al uso del mismo, qué variables o propiedades tenían mayor valor, especialmente con propósitos agrícolas. De acuerdo a Jenny (1980), tanto el tipo como las propiedades del suelo usualmente se relacionan y, combinadas, se usan para definir el estado del sistema suelo. Fue necesario entonces desarrollar clasificaciones tanto para la capacidad de los terrenos como para diferentes propósitos de uso de los suelos. Actualmente, se considera que uno de los retos más importantes que enfrenta la ciencia del suelo es desarrollar criterios de calidad del suelo que se utilicen también en una evaluación objetiva de riesgos ambientales (Sims *et al.*, 1997). Los suelos del mundo desempeñan una importante función en la regulación de las concentraciones de los gases en la atmósfera y esto también se relaciona con su calidad (Bezdicsek *et al.*, 1996).

El Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos de Norteamérica (NRSC, 2001), clasifica la calidad del suelo en Calidad Inherente y Calidad Dinámica. Propiedades tales como Densidad Aparente, pH, Contenidos en Materia Orgánica, etc., son innatas del suelo, determinadas por sus factores formadores y conforman así su calidad inherente, sin embargo al ser modificadas estas propiedades por actividades antropogénicas, da como resultado una calidad dinámica, la cual es una herramienta para proponer y evaluar prácticas de conservación y uso del recurso.

La NRSC (2001) en su guía para valorar la calidad del suelo en planes de conservación, determinó que uno de los problemas más importantes que alteran la calidad del suelo es el cambio en sus contenidos de materia orgánica y residuos, considerando como variables indicadoras del problema el porcentaje de carbono orgánico evaluado por la técnica de Walkley & Black y el porcentaje de nitrógeno total evaluado por la técnica micro-Kjeldahl.

Los resultados de las propiedades físicas y químicas de los suelos que se consideraron para este trabajo se presentan en los cuadros V.4 a la V.9.

**Cuadro V.4.** Propiedades físicas de los sitios estudiados de La Malinche deforestados antes de 1986.

Muestra	Densidad aparente g cm <sup>-3</sup>	Humedad %	Textura			Color		
			arena %	arcilla %	limo %	textura	Suelo seco	Suelo húmedo
MAL01	1,19	22.52	73.64	04.24	22.12	Franco Arenosa	2.5 Y 4/2	10 YR 2/1
MAL04	1.35	13.55	59.48	02.16	38.36	Franco Arenosa	2.5 Y 5/2	2.5 Y 3/2
MAL05	0.89	30.10	62.20	07.80	30.00	Franco Arenosa	2.5 Y 4/3	2.5 Y 3/2
MAL07	1.35	21.31	77.48	03.24	19.28	Arena Francosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 4/3
MAL08	1.22	23.68	93.48	04.16	02.36	Arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 3/2
MAL13	0.77	32.19	67.84	05.80	26.36	Franco Arenosa	2.5 Y 4/3	2.5 Y 3/2
MAL15	1.16	32.21	69.20	11.80	19.00	Franco Arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 4/3
MAL16-1	1.04	39.62	57.48	12.52	30.00	Franco Arenosa	2.5 Y 4/2	10 YR 3/1
MAL17	1.24	37.55	67.48	12.52	20.00	Franco Arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 3/2
MAL19	1.37	28.09	88.20	01.80	10.00	Arenosa	10 YR 4/2	10 YR 4/2
MAL20	1.06	26.11	81.84	-02.20	20.36	Arena Francosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
MAL22	1.37	15.45	87.48	00.52	12.00	Arenosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
MAL23	1.57	19.02	82.20	03.80	14.00	Arena Francosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
MAL28	1.46	19.45	84.20	03.80	12.00	Arena Francosa	5 Y 3/2	5 Y 3/1
MAL30	1,37	10.74	75.48	08.16	16.36	Franco Arenosa	10 YR 4/2	10 YR 3/2

**Cuadro V.5.** Propiedades físicas de los sitios estudiados de La Malinche deforestados entre 1986 y 2002.

Muestra	Densidad aparente g cm <sup>-3</sup>	Humedad %	Textura			textura	Color	
			arena %	arcilla %	limo %		Suelo seco	Suelo húmedo
8MAL01-1	0.66	58.12	63.84	09.80	26.36	Franco arenosa	2.5 Y 4/3	2.5 Y 3/2
8MAL02	0.92	34.43	60.76	08.88	30.36	Franco arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 4/3
8MAL03	1.00	37.09	63.20	03.16	33.64	Franco arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 3/2
8MAL07	1.31	17.21	81.84	01.80	16.36	Arena Francosa	2.5 Y 4/3	2.5 Y 3/2
8MAL09	1.20	21.87	83.48	01.24	15.28	Arena Francosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 4/3
8MAL12	0.84	37.53	74.76	05.24	20.00	Arena Francosa	2.5 Y 4/2	10 YR 3/1
8MAL13	0.63	56.74	63.48	12.16	24.36	Franco arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 3/2
8MAL15	0.93	32.50	73.84	03.80	22.36	Franco arenosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
8MAL16-1	1.34	10.26	81.84	04.16	14.00	Franco arenosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
8MAL20	0.67	48.16	59.84	09.24	30.92	Franco arenosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
8MAL22	0.71	42.11	62.92	08.36	28.72	Franco arenosa	5 Y 3/2	5 Y 3/1
8MAL23	0.96	30.27	80.76	02.88	16.36	Arena Francosa	10 YR 4/2	10 YR 3/2
8MAL25	1.23	13.69	78.48	04.16	17.36	Arena Francosa	2.5 Y 4/3	2.5 Y 3/2
8MAL26	0.97	42.03	57.48	11.80	30.72	Franco arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 4/3
8MAL30-1	0.95	25.48	55.28	12.36	32.36	Franco arenosa	2.5 Y 4/2	10 YR 3/1

**Cuadro V.6.** Propiedades físicas de los sitios estudiados de La Malinche, que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque.

Muestra	Densidad aparente g cm <sup>-3</sup>	Humedad %	Textura			Color		
			arena %	arcilla %	limo %	textura	Suelo seco	Suelo húmedo
OMAL01-1	0.74	46.07	63.76	07.60	28.64	Franco Arenosa	2.5 Y 4/2	10 YR 2/1
OMAL04	1.35	17.66	77.84	04.52	17.64	Arena Francosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 4/3
OMAL05	1.08	23.68	74.20	04.36	21.44	Franco Arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 3/2
OMAL06	0.87	36.81	63.84	20.16	16.00	Franco Arcillo Arenosa	2.5 Y 4/3	2.5 Y 3/2
OMAL10	1.32	23.66	73.64	04.24	22.12	Franco Arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 4/3
OMAL12	0.69	39.13	51.12	10.52	38.36	Franca	2.5 Y 4/2	10 YR 3/1
OMAL13	0.84	26.24	63.12	11.24	25.64	Franco Arenosa	2.5 Y 5/3	2.5 Y 3/2
OMAL18	0.73	34.13	63.84	07.80	28.36	Franco Arenosa	10 YR 4/2	10 YR 4/2
OMAL20	1.37	29.41	63.84	14.16	22.00	Franco Arenosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
OMAL21	0.94	42.00	57.12	12.52	30.36	Franco Arenosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
OMAL22	1.20	20.15	88.20	01.80	10.00	Arenosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
OMAL24	0.80	42.40	67.84	09.80	22.36	Franco Arenosa	5 Y 3/2	5 Y 3/1
OMAL25	1.13	33.25	71.20	03.80	25.00	Franco Arenosa	10 YR 4/2	10 YR 3/2
OMAL27-1	0.66	33.63	65.48	07.80	26.72	Franco Arenosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2
OMAL30	1.16	18.62	78.92	04.36	16.72	Areno Francosa	2.5 Y 4/2	2.5 Y 3/2

**Cuadro V.7.** Propiedades químicas de los sitios estudiados de La Malinche deforestados antes de 1986.

Muestra	Acidez	Acidez	$\Delta$ pH	pH (NaF/suelo)	CIC Cmol kg <sup>-1</sup>	Bases Intercambiables			
	Hidrolítica pH (agua/suelo)	Intercambiable pH (KCl/suelo)				Ca <sup>++</sup> Cmol kg <sup>-1</sup>	Mg <sup>++</sup> Cmol kg <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup> Cmol kg <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> Cmol kg <sup>-1</sup>
MAL01	4.7	4.3	-0.4	4.3	3.4	2.2	0.4	2.7	1.7
MAL04	4.1	4.1	0.0	4.1	18.8	7.6	0.6	6.2	9.4
MAL05	4.9	4.7	-0.3	4.7	11.4	3.6	0.0	6.7	5.7
MAL07	4.3	4.3	0.1	4.3	3.8	2.0	1.6	1.5	1.9
MAL08	5.5	5.1	-0.4	5.1	14.4	3.2	-0.6	7.3	7.2
MAL13	5.8	5.5	-0.3	5.5	18.4	6.6	2.0	8.4	9.2
MAL15	5.2	4.9	-0.3	4.9	6.0	3.6	0.6	5.9	3.0
MAL16-1	5.4	5.1	-0.3	5.1	5.8	5.0	1.6	7.0	2.9
MAL17	5.5	5.0	-0.5	5.0	4.4	2.0	0.6	6.2	2.2
MAL19	5.7	5.4	-0.3	5.4	17.2	2.4	2.2	4.9	8.6
MAL20	4.6	4.3	-0.4	4.3	9.8	2.2	0.0	6.5	4.9
MAL22	4.5	4.4	-0.1	4.4	6.8	1.6	0.6	7.1	3.4
MAL23	4.5	4.1	-0.3	4.1	8.0	2.4	1.6	3.5	4.0
MAL28	4.3	4.1	-0.2	4.1	4.6	1.2	1.2	3.6	2.3
MAL30	5.0	4.5	-0.6	4.5	13.4	2.4	0.8	3.2	6.7

**Cuadro V.8.** Propiedades químicas de los sitios estudiados de La Malinche deforestados entre 1986 y 2002.

Muestra	Acidez	Acidez	$\Delta$ pH	pH	CIC	Bases Intercambiables			
	Hidrolítica	Intercambiable				Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
	pH	pH							
	(agua/suelo)	(KCl/suelo)		(NaF/suelo)	Cmol kg <sup>-1</sup>	Cmol kg <sup>-1</sup>	Cmol kg <sup>-1</sup>	Cmol kg <sup>-1</sup>	Cmol kg <sup>-1</sup>
8MAL01-1	4.5	4.2	-0.3	11.5	13.0	08.0	1.2	4.7	6.5
8MAL02	5.2	4.5	-0.7	12.0	09.0	03.8	3.2	5.0	4.5
8MAL03	5.0	4.8	-0.2	13.0	07.8	03.0	1.6	4.2	3.9
8MAL07	5.1	5.0	0.0	12.0	08.4	01.8	0.8	3.9	4.2
8MAL09	4.8	4.5	-0.3	12.0	12.4	03.2	1.8	4.8	6.2
8MAL12	6.0	5.6	-0.4	12.0	02.8	15.2	-6.6	5.0	1.4
8MAL13	5.7	5.3	-0.3	12.0	09.0	10.4	6.0	3.9	4.5
8MAL15	5.3	4.9	-0.4	13.0	05.8	06.2	1.8	4.4	2.9
8MAL16-1	5.4	5.1	-0.4	11.0	07.2	01.4	5.4	5.1	3.6
8MAL20	5.1	4.9	-0.2	12.0	19.2	06.8	3.2	4.5	9.6
8MAL22	5.7	5.0	-0.7	13.0	06.2	10.8	-0.6	4.1	3.1
8MAL23	5.6	5.1	-0.5	12.0	17.6	05.2	0.4	4.3	8.8
8MAL25	5.3	4.7	-0.5	12.0	17.2	04.6	2.4	4.0	8.6
8MAL26	4.7	4.2	-0.5	13.0	06.8	04.4	0.2	5.7	3.4
8MAL30-1	5.4	4.9	-0.5	11.5	09.6	04.6	3.8	4.2	4.8

**Cuadro V.9.** Propiedades químicas de los sitios estudiados de La Malinche, que en la actualidad (2002 -2012) conservan vegetación de bosque.

Muestra	Acidez		$\Delta$ pH	pH (NaF/suelo)	CIC Cmol kg <sup>-1</sup>	Bases Intercambiables			
	Hidrolítica pH (agua/suelo)	Intercambiable pH (KCl/suelo)				Ca <sup>++</sup> Cmol kg <sup>-1</sup>	Mg <sup>++</sup> Cmol kg <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup> Cmol kg <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> Cmol kg <sup>-1</sup>
OMAL01-1	5.2	4.8	-0.5	13.0	13.2	6.0	1.4	06.6	06.6
OMAL04	5.6	5.0	-0.6	11.0	11.0	2.4	0.4	06.4	05.5
OMAL05	5.4	5.0	-0.4	12.0	12.4	4.0	1.0	06.1	06.2
OMAL06	4.6	4.3	-0.3	12.0	10.6	3.0	4.0	05.2	05.3
OMAL10	5.4	5.1	-0.3	12.0	06.6	4.4	1.2	10.0	03.3
OMAL12	6.4	5.9	-0.5	14.0	07.2	8.6	4.6	07.8	03.6
OMAL13	5.1	4.7	-0.4	13.0	18.8	6.0	1.4	07.3	09.4
OMAL18	6.0	5.6	-0.5	13.0	20.4	8.2	3.0	07.6	10.2
OMAL20	5.2	4.7	-0.4	11.0	06.0	3.8	4.0	04.7	03.0
OMAL21	5.4	5.0	-0.4	12.5	05.6	6.0	-0.2	07.5	02.8
OMAL22	5.0	4.8	-0.2	11.5	05.4	2.2	-0.2	04.1	02.7
OMAL24	5.8	5.4	-0.4	11.0	06.4	8.0	1.0	08.4	03.2
OMAL25	6.4	6.2	-0.3	11.0	06.0	6.6	1.4	05.3	03.0
OMAL27-1	5.7	5.4	-0.3	11.0	08.0	7.8	1.6	07.1	04.0
OMAL30	5.2	4.8	-0.4	10.0	08.4	2.8	1.4	05.8	04.2

## V.5.2. Discusión sobre las propiedades físicas de los suelos.

**V.5.2.1. Densidad aparente.** La densidad aparente del suelo expresa el contenido de sólidos por unidad de volumen ( $\text{g cm}^{-3}$ ). En este estudio la determinación de la densidad aparente fue necesaria para determinar la masa del suelo y consecuentemente obtener el contenido de carbono por unidad de superficie. Sin embargo esta propiedad no sólo sirve para este fin.

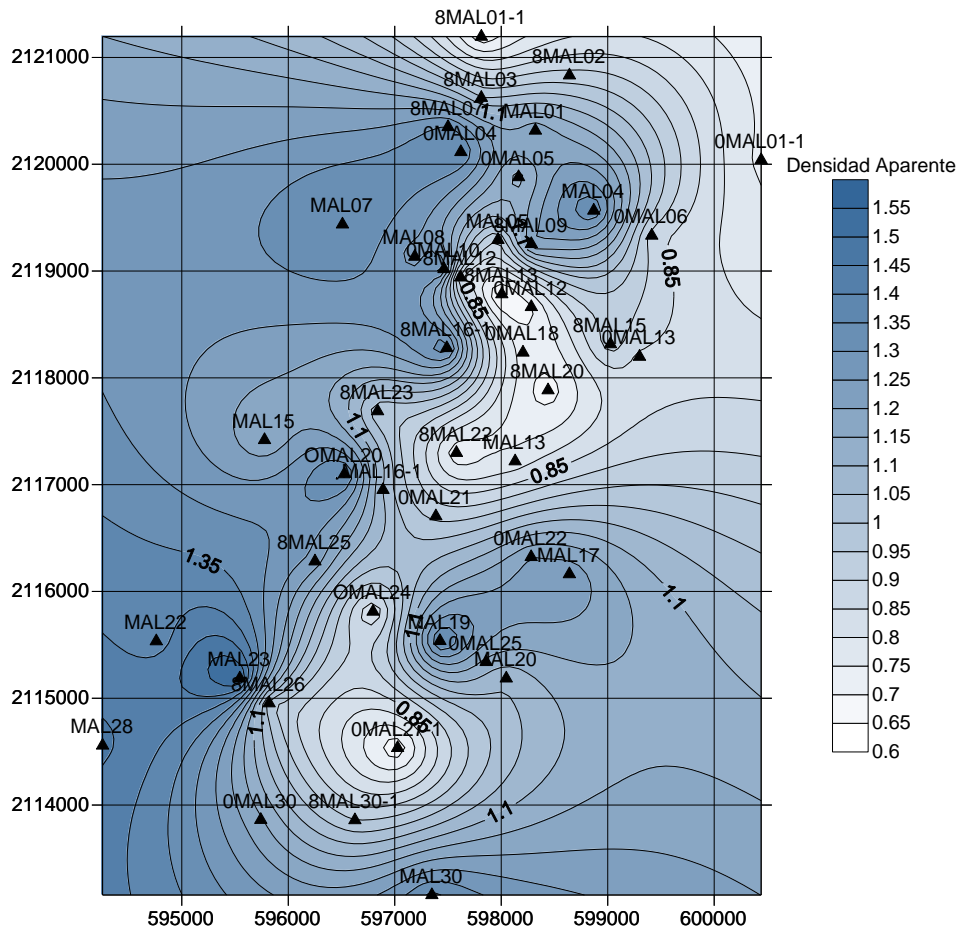
**Cuadro V.10.** Comparación entre las densidades aparentes de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Densidad aparente (<math>\text{g cm}^{-3}</math>)</b>	<b>Muestra</b>	<b>Densidad aparente (<math>\text{g cm}^{-3}</math>)</b>	<b>Muestra</b>	<b>Densidad aparente (<math>\text{g cm}^{-3}</math>)</b>
OMAL01-1	0.74	8MAL01-1	0.66	MAL01	1.19
OMAL04	1.35	8MAL02	0.92	MAL04	1.35
OMAL05	1.08	8MAL03	1.00	MAL05	0.89
OMAL06	0.87	8MAL07	1.31	MAL07	1.35
OMAL10	1.32	8MAL09	1.20	MAL08	1.22
OMAL12	0.69	8MAL12	0.84	MAL13	0.77
OMAL13	0.84	8MAL13	0.63	MAL15	1.16
OMAL18	0.73	8MAL15	0.93	MAL16-1	1.04
OMAL20	1.37	8MAL16-1	1.34	MAL17	1.24
OMAL21	0.94	8MAL20	0.67	MAL19	1.37
OMAL22	1.20	8MAL22	0.71	MAL20	1.06
OMAL24	0.80	8MAL23	0.96	MAL22	1.37
OMAL25	1.13	8MAL25	1.23	MAL23	1.57
OMAL27-1	0.66	8MAL26	0.97	MAL28	1.46
OMAL30	1.16	8MAL30-1	0.95	MAL30	1.37
Promedio	0.99	Promedio	0.95	Promedio	1.22



La densidad aparente indica la compactación del suelo que causa disminución de la macroporosidad y con ello afecta la capacidad de infiltración del agua, ocasionando un mayor escurrimiento superficial, erosión y una menor capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del suelo, lo cual tiene especial importancia en áreas agrícolas de temporal. También origina una barrera o impedimento mecánico para la penetración de las raíces, disminuyendo con ello su capacidad de exploración y extracción de agua y nutrientes (Medina *et al.*, 2006).

En áreas agrícolas, generalmente la compactación tiende a ser mayor, y por ende la densidad aparente también. Lo contrario, es decir, la densidad aparente tiende a bajar, cuando la estructura del suelo es buena y su porosidad es mayor (como ocurre en áreas forestales). El análisis de los resultados obtenidos ratifica lo anterior para los suelos estudiados, las áreas agrícolas o aquellas que tienen vegetación primaria perturbada o vegetación secundaria tienen densidades aparentes más altas que aquellas áreas con bosque (Cuadro V.10), lo que se puede observar en la figura V.19.



**Figura V.19.** Cambio espacial de la Densidad Aparente de los suelos.

El análisis estadístico de las medias de densidad aparente que se hizo con base en la prueba ANOVA y que fue aplicado a los diferentes bloques de estudio, indicó que, al menos una de las medias de alguno de tres bloques era diferente (Cuadro V.11 y Cuadro V.12).

**Cuadro V.11.** ANOVA de una entrada de densidad aparente.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Valor P</b>
Factor	2	0.6556	0.3278	5.98	0.005
Error	42	2.3041	0.0549		
Total	44	2.9597			

**Cuadro V.12.** Estadísticos descriptivos de densidad aparente.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
MAL	15	1.2273	0.2163
8MAL	15	0.9547	0.2332
0MAL	15	0.9920	0.2519

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

0MAL = Sitios que en la actualidad (2002- 2012) conservan vegetación de bosque

Al aplicar la prueba de comparaciones múltiples de Fisher (Cuadro V.13), se verificó que entre los bloques 8MAL y 0MAL no hay diferencias significativas de las medias de densidad aparente. Al comparar 8MAL con MAL resultó que sí hay diferencia entre las medias de ambos bloques. Por último, en la comparación de 0MAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques también son distintas significativamente.

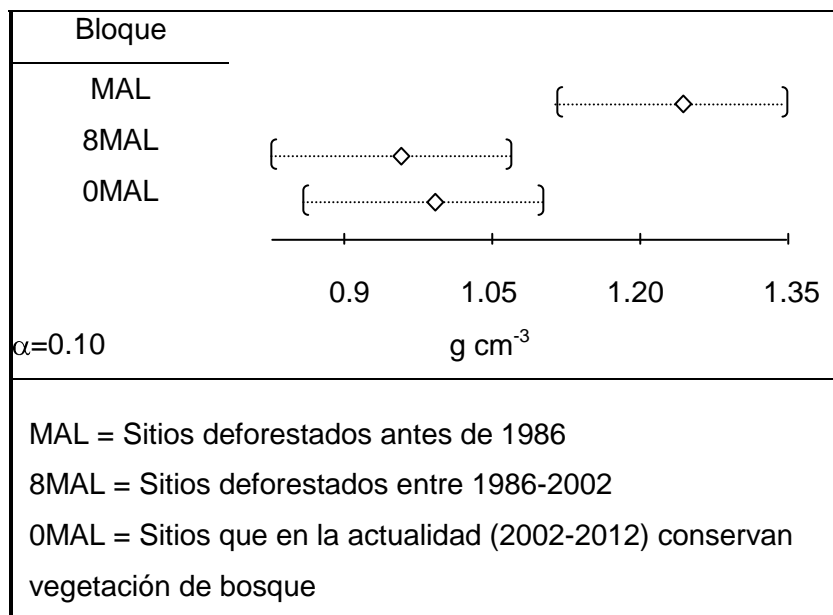
**Cuadro V.13.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % de densidad aparente.

Factor 8MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
0MAL	-0.1353	0.0373	0.2099
MAL	0.1001	0.2727	0.4453

Factor 0MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	0.0627	0.2353	0.4079



**Figura V.20.** Gráfico descriptivo de las medias de densidad aparente para los diferentes bloques de estudio

Los resultados nos indican que el cambio en la densidad aparente de los suelos correspondientes a los sitios deforestados antes de 1986 (MAL), fue ocasionado por el proceso de degradación física ocurrido como consecuencia del cambio de uso del suelo. Este proceso de degradación física se expresa por el aumento en la densidad aparente del suelo y por consiguiente una pérdida de la porosidad y destrucción de la estructura.

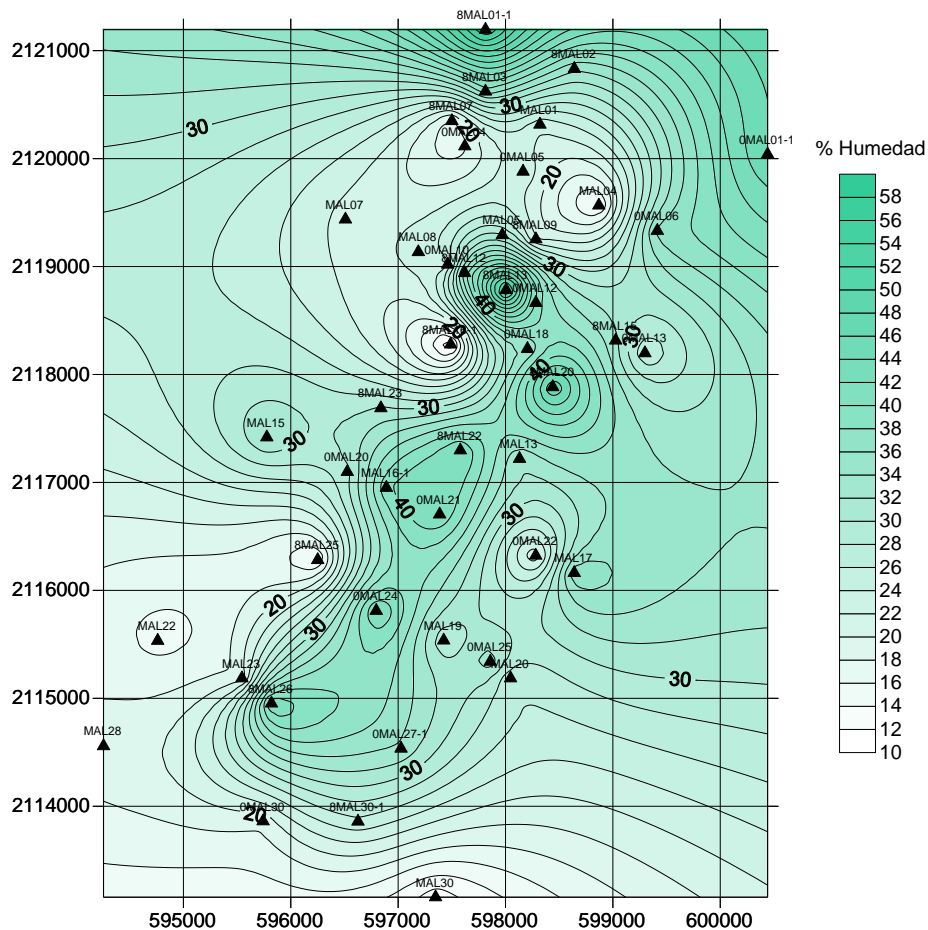
El que no exista diferencia significativa entre la densidad aparente de los suelos de los sitios deforestados entre 1986-2002 (8MAL) y los suelos que conservan vegetación de bosque (0MAL), es un reflejo de la alta capacidad amortiguadora o resiliente del sistema suelo, en particular de aquel formado o derivado de materiales piroclásticos en condiciones de vegetación de bosque templado.

**V.5.2.2. Porcentaje de humedad.** La humedad del suelo es la cantidad de agua que contiene éste, por volumen ocupado por la fase sólida. Cuando hay una pérdida de la cobertura vegetal, la humedad disminuye por el aumento en la incidencia de la radiación solar sobre la superficie del suelo que provoca una mayor evaporación del agua (Martínez y Fernández, 2004). Es así, que en suelos agrícolas, donde además la labranza aumenta la aireación, donde el porcentaje de humedad es menor comparado con el que hay en zonas boscosas. Este mismo efecto se puede ver en los suelos estudiados en este trabajo.

**Cuadro V.14.** Comparación entre los porcentajes de humedad de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Muestra</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Muestra</b>	<b>Humedad (%)</b>
OMAL01-1	46.07	8MAL01-1	58.12	MAL01	22.52
OMAL04	17.66	8MAL02	34.43	MAL04	13.55
OMAL05	23.68	8MAL03	37.09	MAL05	30.10
OMAL06	36.81	8MAL07	17.21	MAL07	21.31
OMAL10	23.66	8MAL09	21.87	MAL08	23.68
OMAL12	39.13	8MAL12	37.53	MAL13	32.19
OMAL13	26.24	8MAL13	56.74	MAL15	32.21
OMAL18	34.13	8MAL15	32.50	MAL16-1	39.62
OMAL20	29.41	8MAL16-1	10.26	MAL17	37.55
OMAL21	42.00	8MAL20	48.16	MAL19	28.09
OMAL22	20.15	8MAL22	42.11	MAL20	26.11
OMAL24	42.40	8MAL23	30.27	MAL22	15.45
OMAL25	33.25	8MAL25	13.69	MAL23	19.02
OMAL27-1	33.63	8MAL26	42.03	MAL28	19.45
OMAL30	18.62	8MAL30-1	25.48	MAL30	10.74
Promedio	31.12	Promedio	33.83	Promedio	24.77

Los resultados de esta medición se observan en el cuadro V.14 y en la figura V.21. La alta retención de agua en estos suelos es debida a la naturaleza no cristalina de sus coloides minerales y se relaciona íntimamente con su baja densidad aparente (Uehara y Gillman, 1981; Qafoku *et al.*, 2004).



**Figura V.21.** Cambio espacial del % de humedad de los suelos.

En el análisis estadístico de las medias aplicado a los tres bloques de estudio, con base en la prueba ANOVA, se pudo ver que no hay diferencias significativas en la media de los porcentajes de humedad de los bloques estudiados (Ver cuadros V.15 y V.16).

**Cuadro V.15.** ANOVA de una entrada del porcentaje de humedad.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Factor	2	203.4	101.7	2.38	0.105
Error	42	1796.6	42.8		
Total	44	2000.0			

**Cuadro V.16.** Estadísticos descriptivos del porcentaje de humedad.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
MAL	15	19.501	5.517
8MAL	15	24.447	8.296
0MAL	15	23.385	5.391

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

0MAL = Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque

Al aplicar la prueba de comparaciones múltiples de Fisher (Cuadro V.17.) se corroboran los resultados de la prueba ANOVA. Cuando se compararon los bloques 8MAL con 0MAL el resultado es que no existen diferencias significativas entre las medias de los valores de porcentaje de humedad. Lo mismo ocurre en las comparaciones de 8MAL con MAL y de 0MAL con MAL.

**Cuadro V.17.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95% del porcentaje de humedad.

Factor 8MAL se sustrae de:

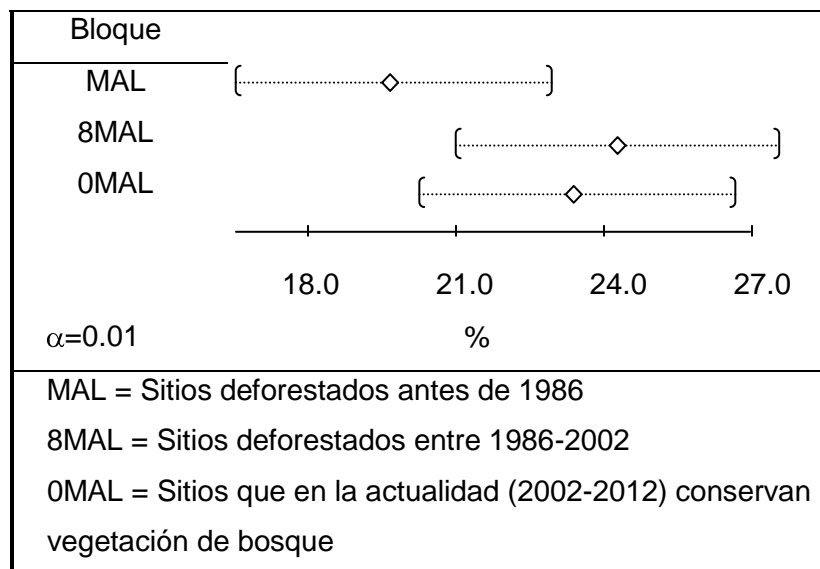
Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
0MAL	-5.882	-1.063	3.757
MAL	-9.766	-4.946	-0.126

Factor 0MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	-8.703	-3.883	0.936

La figura V.22, muestra un gráfico descriptivo de los resultados encontrados en el análisis estadístico.

La razón por la que, en los suelos de los tres bloques de estudio, no existe diferencia significativa entre sus porcentajes de humedad, es que la pérdida de cobertura vegetal no ha afectado aún la capacidad del suelo para almacenar agua, y esto es nuevamente un reflejo de la alta resiliencia de los suelos derivado de materiales piroclásticos en condiciones de vegetación de bosque templado.



**Figura V.22.** Gráfico descriptivo de las medias del porcentaje de humedad para los diferentes bloques de estudio

### V.5.3. Discusión sobre las propiedades químicas de los suelos.

**V.5.3.1. Acidez hidrolítica.** La acidez hidrolítica, asociada a la magnitud de pH, es una propiedad que influye tanto en sus características químicas como físicas, además de tener considerable impacto sobre la vida microbiana de este medio (Valera, 1994).

El pH del suelo afecta la disponibilidad de los nutrientes y la solubilidad de minerales del suelo. Factores importantes que afectan el pH edáfico son temperatura y precipitaciones, que controlan la intensidad del lixiviado y la meteorización de los minerales del suelo. La acidez por lo general está asociada con suelos lixiviados; la alcalinidad mayormente aparece en regiones más secas. Sin embargo, prácticas agrícolas, tales como el encalado o el agregado de fertilizantes de amonio, puedan alterar el pH (USDA, 1999).

**Cuadro V.18.** Comparación del pH medido en agua (relación 1:2) de los suelos estudiados.

Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque		Sitios deforestados entre 1986-2002		Sitios deforestados antes de 1986	
Muestra	pH en Agua	Muestra	pH en Agua	Muestra	pH en Agua
OMAL01-1	5.2	8MAL01-1	4.5	MAL01	4.7
OMAL04	5.6	8MAL02	5.2	MAL04	4.1

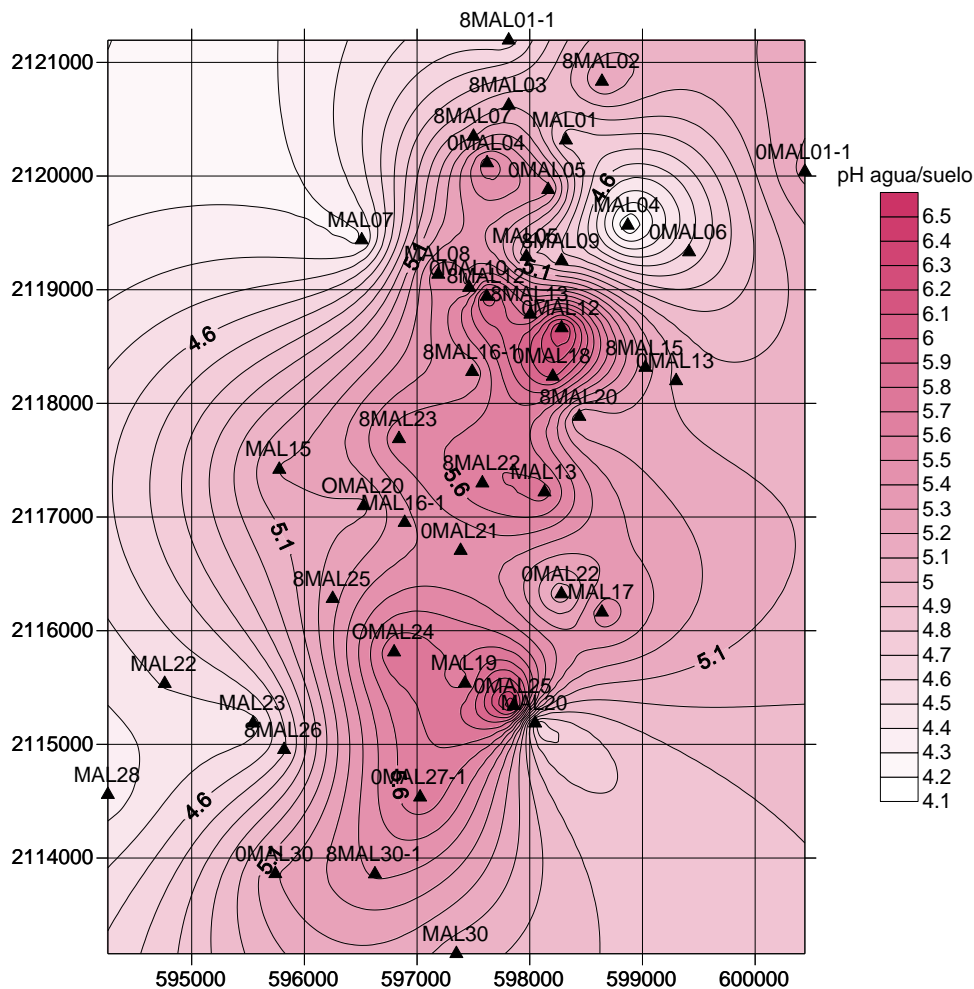
OMAL05	5.4	8MAL03	5.0	MAL05	4.9
OMAL06	4.6	8MAL07	5.1	MAL07	4.3
OMAL10	5.4	8MAL09	4.8	MAL08	5.5
OMAL12	6.4	8MAL12	6.0	MAL13	5.8
OMAL13	5.1	8MAL13	5.7	MAL15	5.2
OMAL18	6.0	8MAL15	5.3	MAL16-1	5.4
OMAL20	5.2	8MAL16-1	5.4	MAL17	5.5
OMAL21	5.4	8MAL20	5.1	MAL19	5.7
OMAL22	5.0	8MAL22	5.7	MAL20	4.6
OMAL24	5.8	8MAL23	5.6	MAL22	4.5
OMAL25	6.4	8MAL25	5.3	MAL23	4.5
OMAL27-1	5.7	8MAL26	4.7	MAL28	4.3
OMAL30	5.2	8MAL30-1	5.4	MAL30	5.0
Promedio	5.5	Promedio	5.3	Promedio	4.9

**Cuadro V.19.** Clasificación de los suelos en función del pH (suelo:agua relación 1:2)

<b>Grado de acidez o alcalinidad</b>	<b>pH</b>
Extremadamente ácido	< 4.6
Ácido	4.6 – 5.4
Moderadamente ácido	5.5 – 6.4
Neutro	6.5 – 7.3
Moderadamente alcalino	7.4 – 8.1
Alcalino	8.2 – 8.8
Extremadamente alcalino	> 8.9

El pH de los suelos (medidos en suelo:agua, relación 1:2) se muestra en las cuadro V.18, así como en la figura V.23. En general, los suelos de este estudio varían entre extremadamente a moderadamente ácidos, de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) (Cuadro V.19).





**Figura V.23.** Cambio espacial de la acidez hidrolítica de los suelos.

En la propiedad de acidez hidrolítica, los resultados de la prueba ANOVA, indicaron que al menos una de las medias de alguno de los bloques estudiados era diferente (Cuadros V.20 y V.21).

**Cuadro V.20.** ANOVA de una entrada del pH medido en agua.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Factor	2	2.368	1.184	4.89	0.012
Error	42	10.160	0.242		
Total	<b>44</b>	<b>12.528</b>			

**Cuadro V.21.** Estadísticos descriptivos del pH medido en agua.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
MAL	15	4.9333	0.5551
8MAL	15	5.2533	0.4068
0MAL	15	5.4933	0.5021

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

0MAL = Sitios que en la actualidad (2002- 2012) conservan vegetación de bosque

Aplicando la prueba de comparaciones múltiples de Fisher (Cuadro V.22), resultó que las medias de los valores de acidez hidrolítica para los bloques 8MAL y 0MAL no son significativamente distintas. La misma tendencia prevalece al comparar 8MAL con MAL, es decir, tampoco hay diferencia entre las medias de ambos bloques. Finalmente, en la comparación de 0MAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques sí son diferentes de manera significativa.

Del análisis estadístico podemos concluir que el pH de los suelos de los sitios deforestados antes de 1986 (MAL) y el de los sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque (0MAL) es significativamente diferente, sin embargo no podemos concluir si hay diferencia o no entre los bloques 8MAL contra 0MAL y 8MAL contra MAL debido a que la prueba de comparaciones múltiples de Fisher indica que entre 8MAL y 0MAL no hay diferencias significativas, al igual que en la comparación de 8MAL con MAL, lo cual resulta contradictorio con la aseveración de que las medias de 0MAL y MAL son significativamente diferentes. Probablemente se requieran más número de muestras para concluir cuál es el comportamiento exacto del bloque 8MAL.

**Cuadro V.22.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95% del pH medido en agua.

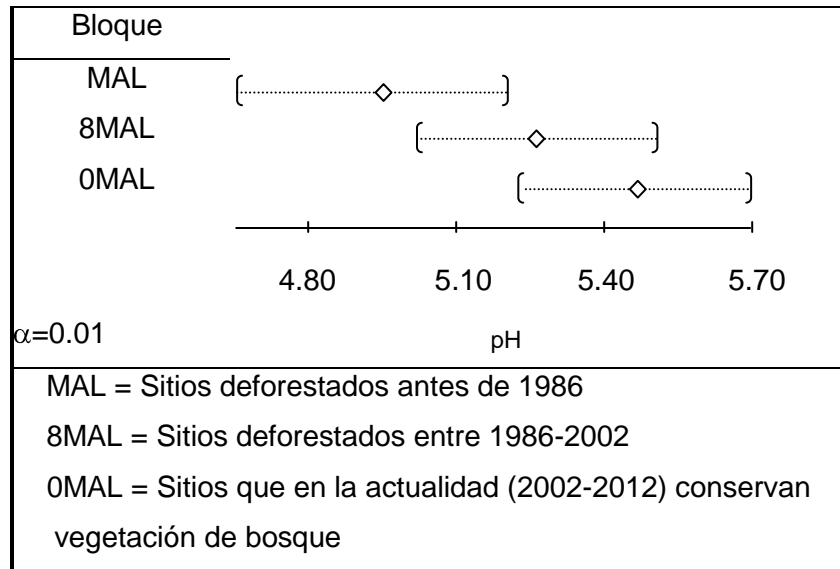
Factor 8MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
0MAL	-0.1224	0.2400	0.6024
MAL	-0.6824	-0.3200	0.0424

Factor 0MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	-0.9224	-0.5600	-0.1976

La figura V.24, muestra un gráfico descriptivo de los resultados encontrados en el análisis estadístico.

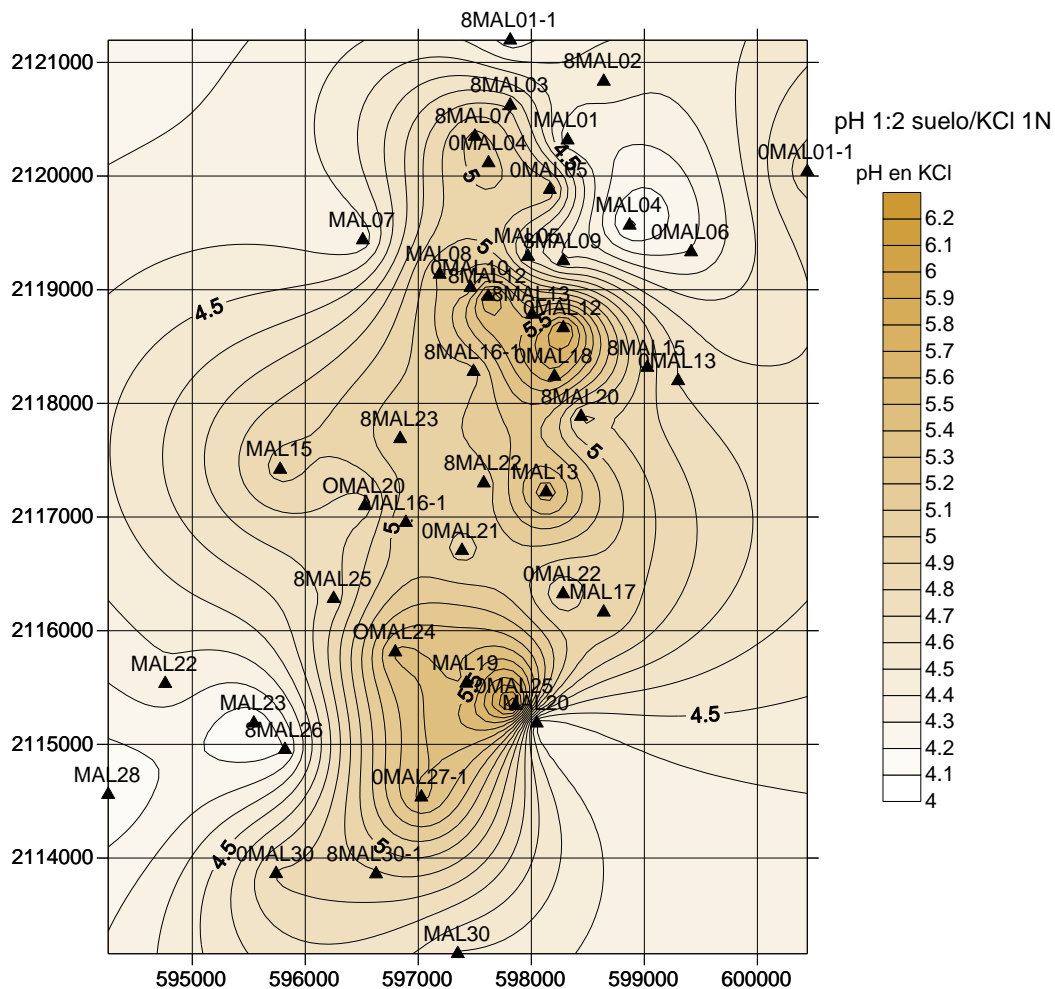


**Figura V.24.** Gráfico descriptivo de las medias del pH medido en agua (relación 1:2) para los diferentes bloques de estudio

**V.5.3.2. Acidez intercambiable.** La acidez intercambiable resulta de la hidrólisis de formas de aluminio fácilmente intercambiables con iones  $K^+$ . Se trata casi enteramente de aluminio monómero que ocupa sedes de intercambio. Se mide con el pH después de desplazar parte de los protones y aluminio monómero con una solución de KCl 1N no tamponada. El pH en KCl (1:2) suele ser del orden de 0.5 a 1.0 unidad de pH inferior al pH medido en agua.

Esta determinación se realiza cuando el pH del suelo es menor de 5.5, o cuando se tiene evidencia de que el suelo contiene cantidades elevadas de aluminio como ocurre en los suelos de origen volcánico.

Los resultados del pH medido en KCl se presentan en el cuadro V.23 y en la figura V.25, en donde se puede observar que para las muestras tomadas, la acidez intercambiable es de 0.1 a 0.7 unidades más baja que el pH medido en agua y se observa que los suelos de los sitios deforestados antes de 1986 presentan un pH más ácido que los suelos de los sitios que en la actualidad conservan vegetación de bosque.



**Figura V.25.** Cambio espacial de la acidez intercambiable de los suelos.

**Cuadro V.23.** Comparación del pH medido en KCl (relación 1:2) de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>pH suelo / KCl</b>	<b>Muestra</b>	<b>pH suelo / KCl</b>	<b>Muestra</b>	<b>pH suelo / KCl</b>
OMAL01-1	4.8	8MAL01-1	4.2	MAL01	4.3
OMAL04	5.0	8MAL02	4.5	MAL04	4.1
OMAL05	5.0	8MAL03	4.8	MAL05	4.7
OMAL06	4.3	8MAL07	5.0	MAL07	4.3
OMAL10	5.1	8MAL09	4.5	MAL08	5.1
OMAL12	5.9	8MAL12	5.6	MAL13	5.5

OMAL13	4.7	8MAL13	5.3	MAL15	4.9
OMAL18	5.6	8MAL15	4.9	MAL16-1	5.1
OMAL20	4.7	8MAL16-1	5.1	MAL17	5.0
OMAL21	5.0	8MAL20	4.9	MAL19	5.4
OMAL22	4.8	8MAL22	5.0	MAL20	4.3
OMAL24	5.4	8MAL23	5.1	MAL22	4.4
OMAL25	6.2	8MAL25	4.7	MAL23	4.1
OMAL27-1	5.4	8MAL26	4.2	MAL28	4.1
OMAL30	4.8	8MAL30-1	4.9	MAL30	4.5
Promedio	5.1	Promedio	4.8	Promedio	4.6

Los resultados del análisis estadístico con base en la prueba ANOVA, mostraron el mismo comportamiento que en la acidez hidrolítica, es decir, al menos una de las medias de alguno de los bloques estudiados es diferente (Cuadros V.24 y V.25).

**Cuadro V.24.** ANOVA de una entrada del pH medido en KCl.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Factor	2	1.600	0.800	3.81	0.030
Error	42	8.832	0.210		
Total	44	10.432			

**Cuadro V.25.** Estadísticos descriptivos del pH medido en KCl.

Nivel	N	Media	Desviación Estándar
MAL	15	4.6533	0.4809
8MAL	15	4.8467	0.3833
OMAL	15	5.1133	0.5027

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

OMAL = Sitios que en la actualidad (2002- 2012) conservan vegetación de bosque

Aplicando la prueba de comparaciones múltiples de Fisher (Cuadro V.26), el resultado es que no existen diferencias significativas entre las medias de los valores de acidez intercambiable para los bloques 8MAL y OMAL. La misma tendencia prevalece al

comparar 8MAL con MAL, es decir, tampoco hay diferencia entre las medias de ambos bloques. Finalmente, en la comparación de 0MAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques sí son significativamente distintas. La figura V.26, muestra un gráfico descriptivo de los resultados encontrados en el análisis estadístico, del cual podemos concluir que la acidez intercambiable de los suelos de los sitios deforestados antes de 1986 (MAL) y el de los sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque (0MAL) es significativamente diferente, sin embargo no podemos concluir si hay diferencia o no entre los bloques 8MAL contra 0MAL y 8MAL contra MAL. Al igual que en el caso de la acidez hidrolítica, probablemente se requieran más número de muestras para el estudio.

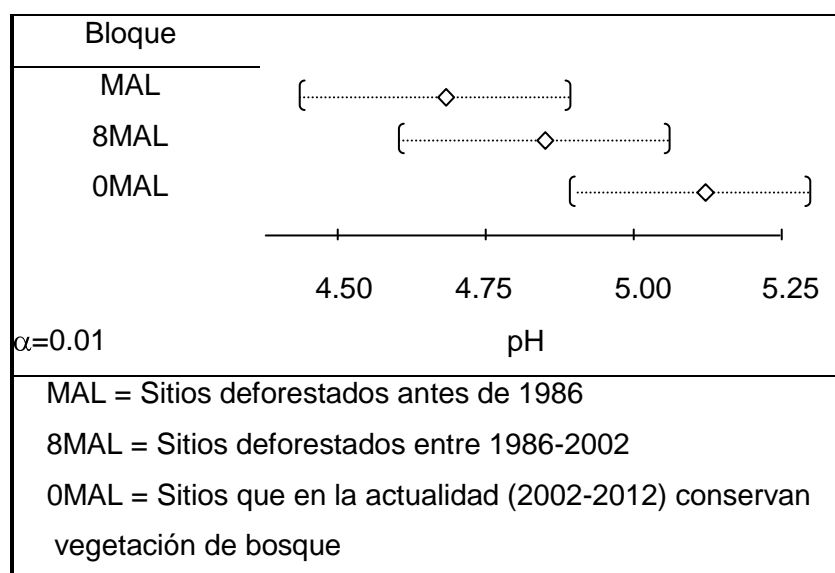
**Cuadro V.26.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95% del pH medido en KCl.

Factor 8MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
0MAL	-0.0713	0.2667	0.6046
MAL	-0.5313	-0.1933	0.1446

Factor 0MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	-0.7979	-0.4600	-0.1221



**Figura V.26.** Gráfico descriptivo de las medias del pH medido en KCl (relación 1:2) para los diferentes bloques de estudio

**V.5.3.3. Delta pH.** Uno de los métodos más aceptados para determinar si un suelo es de carga variable es la determinación del  $\Delta\text{pH}$  (Uehara y Gillman, 1981). Los valores de  $\Delta\text{pH}$  indican lo siguiente:

- El signo y la magnitud de  $\Delta\text{pH}$ , corresponden al signo y a la magnitud de la carga superficial.
- Valores de  $\Delta\text{pH}$  mayores de -0.5 indican que el suelo predominante es de carga variable.
- Valores de  $\Delta\text{pH}$  menores de -0.5, indican que el suelo es de carga permanente.

En suelos ácidos el valor de  $\Delta\text{pH}$  cercano a cero, da indicios de que la muestra presentará bajos contenidos de aluminio extraíble.

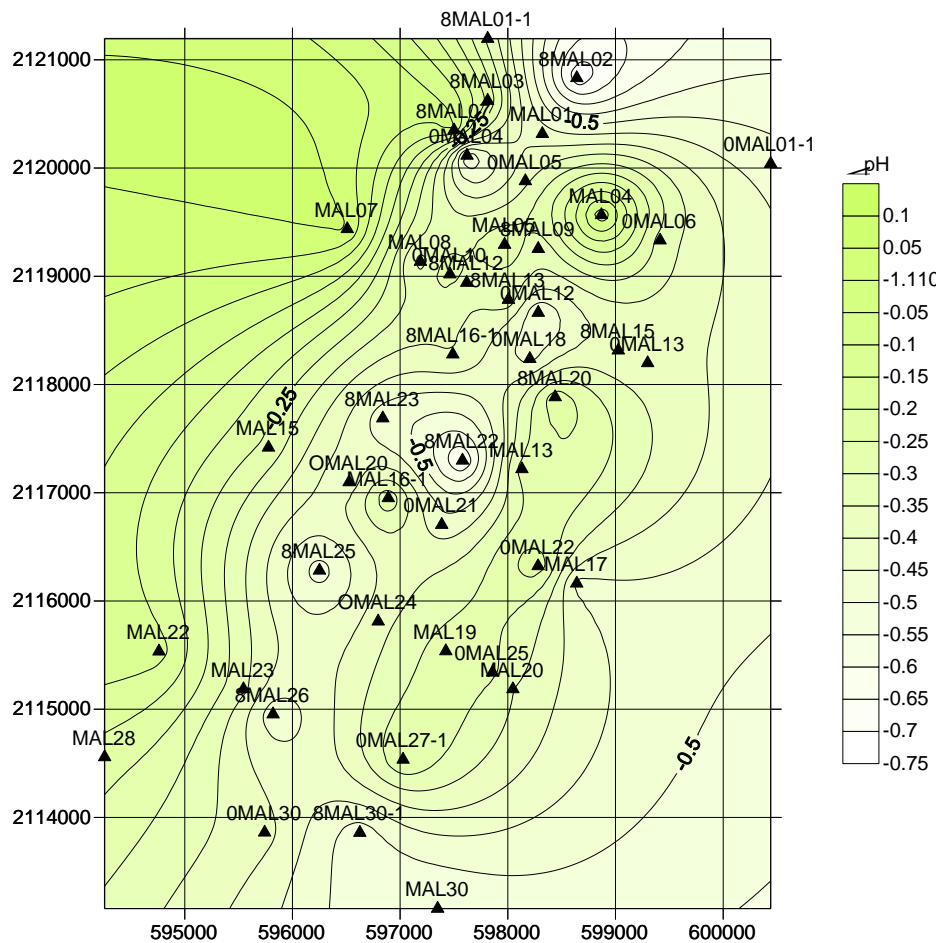
La denominación “suelos de carga variable” comprende un amplio espectro de suelos, que aunque con características morfológicas, mineralógicas, químicas, físicas, biológicas y genéticas diferentes, poseen una propiedad común y es que su carga superficial varía ampliamente, tanto en magnitud como en signo, con los cambios en el pH, fuerza iónica y composición de la solución del suelo. La carga variable procede fundamentalmente, de la abundancia en la fracción coloidal de minerales y compuestos orgánicos que poseen superficies anfotéricas. Entre los minerales se encuentran principalmente los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, los vidrios volcánicos y los minerales arcillosos de rango corto o no cristalinos (minerales alofánicos). Es sobre esta base, que suelos aparentemente diferentes se agrupan conjuntamente como suelos de carga variable (Theng, 1980; Uehara y Gillman, 1981; Qafoku *et al.*, 2004).

En la mayoría de los suelos derivados de materiales volcánicos piroclásticos, como los estudiados en este trabajo, predomina la carga superficial positiva. La magnitud del  $\Delta\text{pH}$ , está también en función del tamaño de las partículas minerales y si éstas son principalmente arenas y limos (vidrios volcánicos), su superficie específica y por consiguiente la dimensión de la interfase sólido-líquido será menor; esto es, el  $\Delta\text{pH}$  variará entre 0 y -0.5. Solo algunas muestras evidencian el mayor contenido en coloides minerales de rango corto o alofánicos. Esto se corrobora en el cuadro V.27, así como en la figura V.27, donde se analiza el cambio espacial del delta pH de los suelos.

**Cuadro V.27.** Comparación del Delta pH de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Delta pH</b>	<b>Muestra</b>	<b>Delta pH</b>	<b>Muestra</b>	<b>Delta pH</b>
OMAL01-1	-0.5	8MAL01-1	-0.3	MAL01	-0.4
OMAL04	-0.6	8MAL02	-0.7	MAL04	0.0
OMAL05	-0.4	8MAL03	-0.2	MAL05	-0.3
OMAL06	-0.3	8MAL07	-0.1	MAL07	0.0
OMAL10	-0.3	8MAL09	-0.3	MAL08	-0.4
OMAL12	-0.5	8MAL12	-0.4	MAL13	-0.3
OMAL13	-0.4	8MAL13	-0.3	MAL15	-0.3
OMAL18	-0.5	8MAL15	-0.4	MAL16-1	-0.3
OMAL20	-0.4	8MAL16-1	-0.4	MAL17	-0.5
OMAL21	-0.4	8MAL20	-0.2	MAL19	-0.3
OMAL22	-0.2	8MAL22	-0.7	MAL20	-0.4
OMAL24	-0.4	8MAL23	-0.5	MAL22	-0.1
OMAL25	-0.3	8MAL25	-0.5	MAL23	-0.3
OMAL27-1	-0.3	8MAL26	-0.5	MAL28	-0.2
OMAL30	-0.4	8MAL30-1	-0.5	MAL30	-0.6
Promedio	-0.4	Promedio	-0.4	Promedio	-0.3





**Figura V.27.** Cambio espacial del Delta pH de los suelos.

El análisis estadístico basado en la prueba ANOVA, indicó que los valores de la media para la prueba de  $\Delta\text{pH}$  no son significativamente diferentes (Cuadros V.28 y V.29).

**Cuadro V.28.** ANOVA de una entrada del Delta pH.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Valor P</b>
Factor	2	0.1138	0.0569	2.18	0.126
Error	42	1.0960	0.0261		
Total	44	1.2098			

**Cuadro V.29.** Estadísticos descriptivos del Delta pH.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
MAL	15	-0.2867	0.1807
8MAL	15	-0.3933	0.1870
0MAL	15	-0.3933	0.1033

MAL = Sitios deforestados antes de 1986  
8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002  
0MAL = Sitios que en la actualidad (2002- 2012) conservan vegetación de bosque

Aplicando la prueba de comparaciones múltiples de Fisher (Cuadro V.30), se aprecia que las medias de los valores de  $\Delta$ pH entre los bloques 8MAL y 0MAL no son significativamente diferentes. La misma tendencia prevalece al comparar 8MAL con MAL y 0MAL con MAL.

**Cuadro V.30.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % del Delta pH.

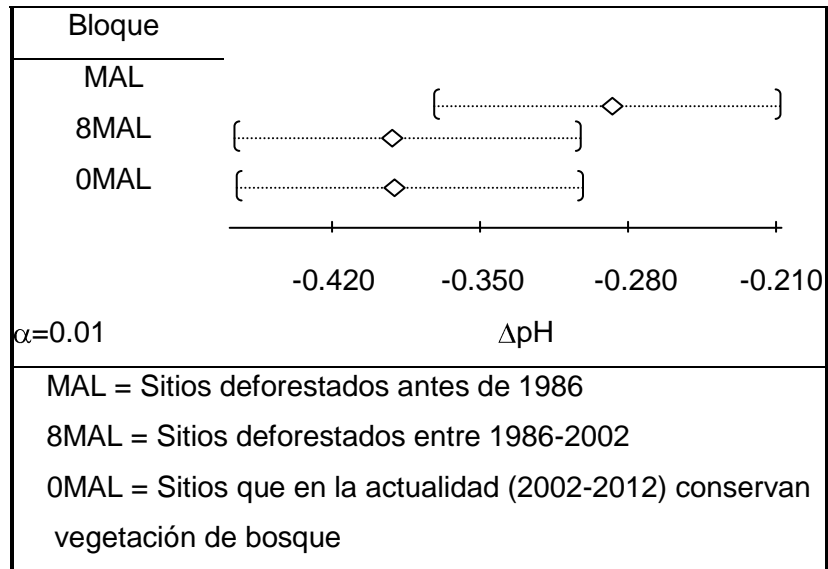
Factor 8MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
0MAL	-0.1190	0.0000	0.1190
MAL	-0.0124	0.1067	0.2257

Factor 0MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	-0.0124	0.1067	-0.2257

La figura V.28, muestra un gráfico descriptivo de los resultados encontrados en el análisis estadístico. Los resultados obtenidos son satisfactorios pues demuestran que los suelos estudiados tienen la misma composición mineralógica debido a una génesis común y por consiguiente el cambio en alguna de las propiedades es causa del cambio de uso del suelo y del tiempo transcurrido en el que se realizó este cambio.



**Figura V.28.** Gráfico descriptivo de las medias del delta pH para los diferentes bloques de estudio

**V.5.3.4. Capacidad de intercambio catiónico.** La CIC del suelo es una medida de la potencialidad del suelo para almacenar nutrientes. Las dos principales variables que controlan la capacidad de intercambio de cationes son el tipo y cantidad de arcillas y el contenido de materia orgánica humificada del suelo. Las unidades de medición de la CIC son;  $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$  de suelo. Esta unidad de carga tiene la misma dimensión que la anteriormente usada de  $\text{meq}/100\text{g}$  de suelo. El humus del suelo contiene la más alta CIC, con alrededor de  $200 \text{ cmolC kg}^{-1}$ , las arcillas vermiculitas presentan  $150 \text{ cmolC kg}^{-1}$ , las esmectitas contribuyen con  $100 \text{ cmolC kg}^{-1}$ , las Illitas y Cloritas con  $30\text{-}40 \text{ cmolC kg}^{-1}$  y las Kaolinitas y Halloysitas contribuyen con  $5\text{-}8 \text{ cmolC kg}^{-1}$  (Thomas y Hargrove, 1984; Brady y Weil, 1996). Wolf(1996) indica que la CIC varía con la clase textural, así, las arenas presentan  $< 4 \text{ cmolC kg}^{-1}$ , los migajones. Los resultados de CIC se presentan en el cuadro V.31 y en la figura V.29.

**Cuadro V.31.** Comparación de CIC de los suelos.

Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque		Sitios deforestados entre 1986-2002		Sitios deforestados antes de 1986	
Muestra	CIC $\text{cmol de C kg}^{-1}$	Muestra	CIC $\text{cmol de C kg}^{-1}$	Muestra	CIC $\text{cmol de C kg}^{-1}$
OMAL01-1	13.2	8MAL01-1	13.0	MAL01	3.4
OMAL04	11.0	8MAL02	9.0	MAL04	18.8

OMAL05	12.4	8MAL03	7.8	MAL05	11.4
OMAL06	10.6	8MAL07	8.4	MAL07	3.8
OMAL10	6.6	8MAL09	12.4	MAL08	14.4
OMAL12	7.2	8MAL12	2.8	MAL13	18.4
OMAL13	18.8	8MAL13	9.0	MAL15	6.0
OMAL18	20.4	8MAL15	5.8	MAL16-1	5.8
OMAL20	6.0	8MAL16-1	7.2	MAL17	4.4
OMAL21	5.6	8MAL20	19.2	MAL19	17.2
OMAL22	5.4	8MAL22	6.2	MAL20	9.8
OMAL24	6.4	8MAL23	17.6	MAL22	6.8
OMAL25	6.0	8MAL25	17.2	MAL23	8.0
OMAL27-1	8.0	8MAL26	6.8	MAL28	4.6
OMAL30	8.4	8MAL30-1	9.6	MAL30	13.4

El análisis estadístico basado en la prueba ANOVA, indicó que los valores de la media para la prueba de CIC no son significativamente diferentes (Cuadros V.32 y V.33).

**Cuadro V.32.** ANOVA de una entrada de Capacidad de Intercambio Catiónico.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Valor P</b>
Factor	2	1,7	0,8	0,03	0,967
Error	42	1059,8	25,2		
Total	44	1061,5			

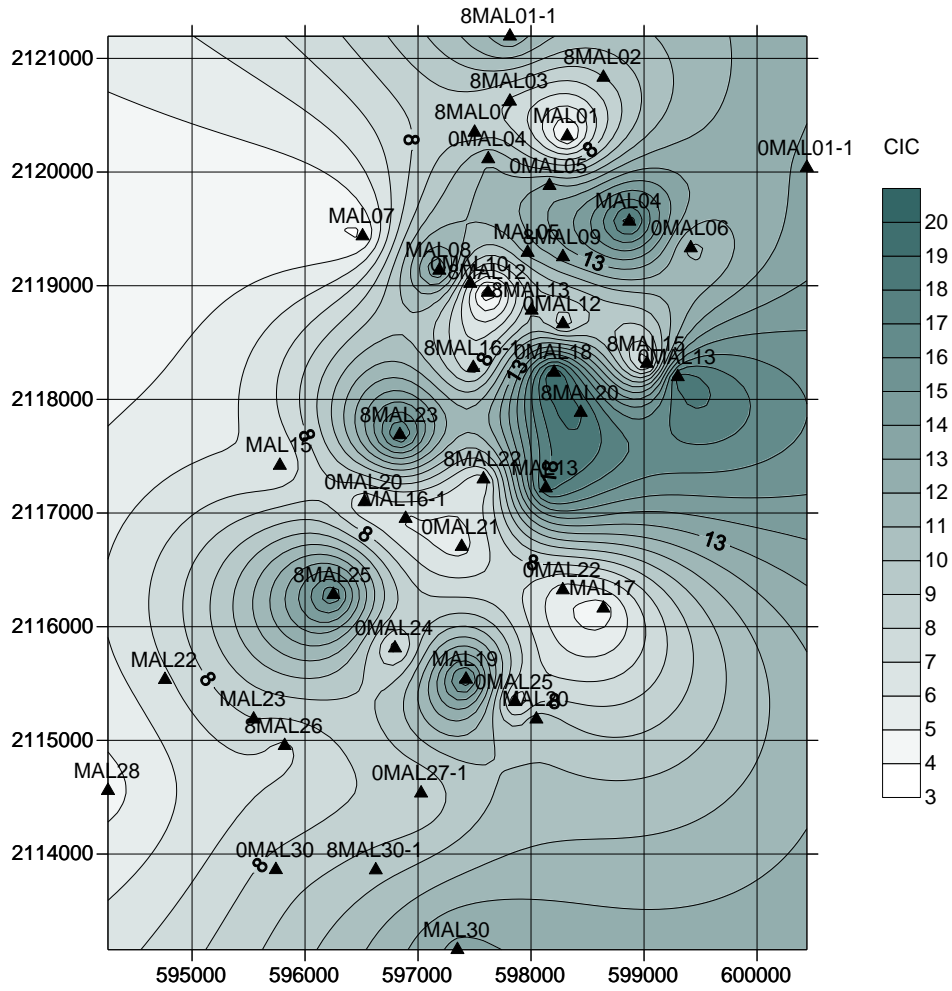
**Cuadro V.33.** Estadísticos de Capacidad de Intercambio Catiónico.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
MAL	15	9.713	5.517
8MAL	15	9.733	4.731
OMAL	15	10.133	4.783

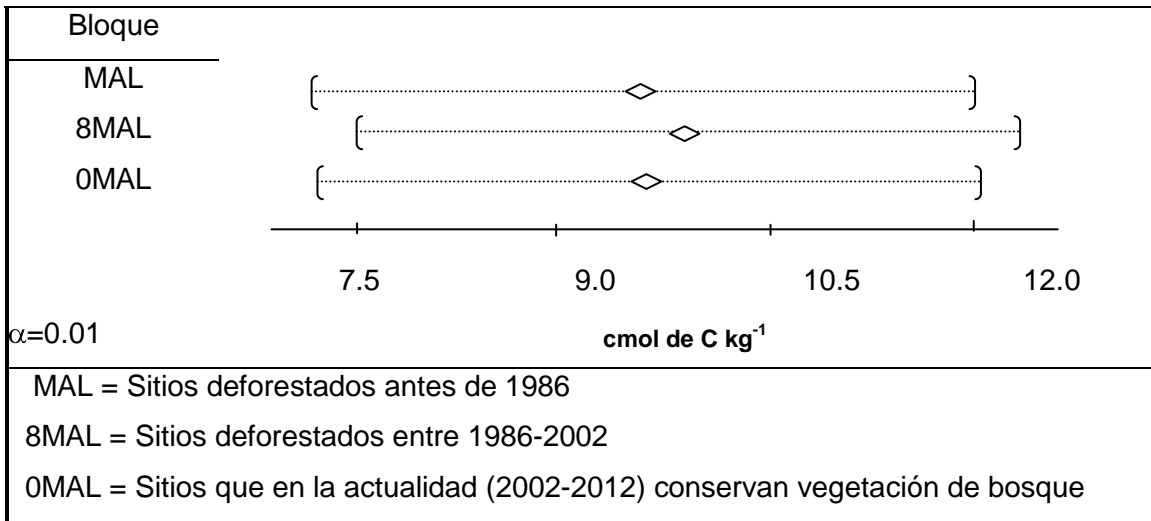
MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

OMAL = Sitios que en la actualidad (2002- 2012) conservan vegetación de bosque



**Figura V.29.** Cambio espacial de CIC de los suelos.



**Figura V.30.** Gráfico descriptivo de las medias de la Capacidad de Intercambio Catiónico para los diferentes bloques de estudio.

La figura V.30, muestra un gráfico descriptivo de los resultados encontrados en el análisis estadístico. La razón por la que, en los suelos de los tres bloques de estudio, no existe diferencia significativa en CIC es porque las características mineralógicas no cambian.

#### V.5.4. Discusión sobre las características de la materia orgánica del suelo.

**V.5.4.1 Contenido de Materia Orgánica y Carbono Orgánico.** En general, los suelos de clima templado (como los presentes en la zona de la Malinche) tienden a presentar niveles más altos de materia orgánica, pues la tasa de mineralización se ve reducida por baja temperatura.

En los suelos de la región de la Malinche hay otro aspecto, además del clima, que influye sobre la acumulación de materia orgánica, y por ende de carbono orgánico. Se trata del hecho de que estos suelos son derivados de materiales volcánicos. Éstos se han definido como suelos minerales que presentan un contenido de materia orgánica de cerca del 8 % en promedio y niveles superiores al 30%, siendo la acumulación de materia orgánica en forma de humus, una característica notable de los suelos derivados de materiales piroclásticos (Leamy *et al.*, 1980; Wada, 1985).

En la cuadro V.34, se muestran los resultados del análisis de los porcentajes de materia orgánica contenidos en los suelos estudiados.

Los valores de referencia para clasificar los suelos derivados de materiales piroclásticos en relación a su porcentaje de materia orgánica se muestran en el cuadro V.35. (Castellanos, Uvalle-Bueno y Aguilar-Santelises, 2000).

**Cuadro V.34.** Comparación del porcentaje de materia orgánica de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>MOS (%)</b>	<b>Muestra</b>	<b>MOS (%)</b>	<b>Muestra</b>	<b>MOS (%)</b>
OMAL01-1	10.66	8MAL01-1	15.77	MAL01	4.46
OMAL04	1.43	8MAL02	7.79	MAL04	4.07
OMAL05	7.08	8MAL03	7.48	MAL05	7.55
OMAL06	9.99	8MAL07	1.78	MAL07	2.99

OMAL10	5.94	8MAL09	4.25	MAL08	1.82
OMAL12	10.95	8MAL12	4.81	MAL13	10.19
OMAL13	12.39	8MAL13	17.97	MAL15	2.14
OMAL18	7.18	8MAL15	6.98	MAL16-1	6.33
OMAL20	3.34	8MAL16-1	2.49	MAL17	3.43
OMAL21	6.84	8MAL20	12.21	MAL19	2.21
OMAL22	0.54	8MAL22	9.65	MAL20	3.25
OMAL24	8.71	8MAL23	8.36	MAL22	1.83
OMAL25	5.23	8MAL25	5.80	MAL23	1.38
OMAL27-1	7.63	8MAL26	7.28	MAL28	1.11
OMAL30	5.62	8MAL30-1	6.73	MAL30	1.57
Promedio	6.90	Promedio	7.95	Promedio	3.62

**Cuadro V.35.** Clasificación de los suelos originados de materiales volcánicos en función de su contenido de materia orgánica.

**Materia orgánica  
(%)**

Muy bajo	Bajo	Mod. Bajo	Medio	Mod. Alto	Alto	Muy alto
<2.0	2.1-3.5	3.6-5	5.1-8	8.1-12.0	12.1-15.0	>15.1

De acuerdo con este cuadro, los porcentajes del bloque MAL van de muy bajos a moderadamente altos. El valor mínimo es de 1.11, el máximo de 10.19 y el promedio de 3.62. Los porcentajes de materia orgánica para el bloque 8MAL van de muy bajos (1.78% de la muestra 8MAL07) a muy altos (17.97% en 8MAL13). El valor promedio es 7.95%. Con respecto a los suelos del grupo OMAL, sus porcentajes de materia orgánica van de muy bajos a altos. El valor más bajo corresponde a la muestra OMAL22 con 0.54% y el más alto lo tiene la muestra OMAL13 con 12.39%. El promedio en los porcentajes para este bloque es de 6.90%.

Para determinar el porcentaje de carbono orgánico en los suelos de la región de la Malinche, se recurrió a la suposición convencional de que la materia orgánica es 1.724 veces mayor que el carbono orgánico, en base a ésta información se hizo el cálculo para conocer el porcentaje de carbono orgánico del suelo partiendo del contenido de la materia orgánica (Aguilar *et al.*, 1987). En el cuadro VI.36, se muestran los resultados del análisis de los porcentajes en carbono orgánico contenidos en los suelos estudiados, así como en

la figura V.31, donde se observa el cambio espacial del porcentaje de carbono orgánico de los suelos. En este cuadro se observa que el valor medio, del porcentaje en carbono orgánico, para el bloque MAL es de 2.10 %, mientras que para el bloque 8MAL es de 4.6 % y 4.00% para 0MAL. Los valores mínimos para los bloques MAL, 8MAL y 0MAL son 0.64 %, 1.03% y 0.31% respectivamente; mientras que los valores máximos son 5.91%, 10.42% y 7.18%.

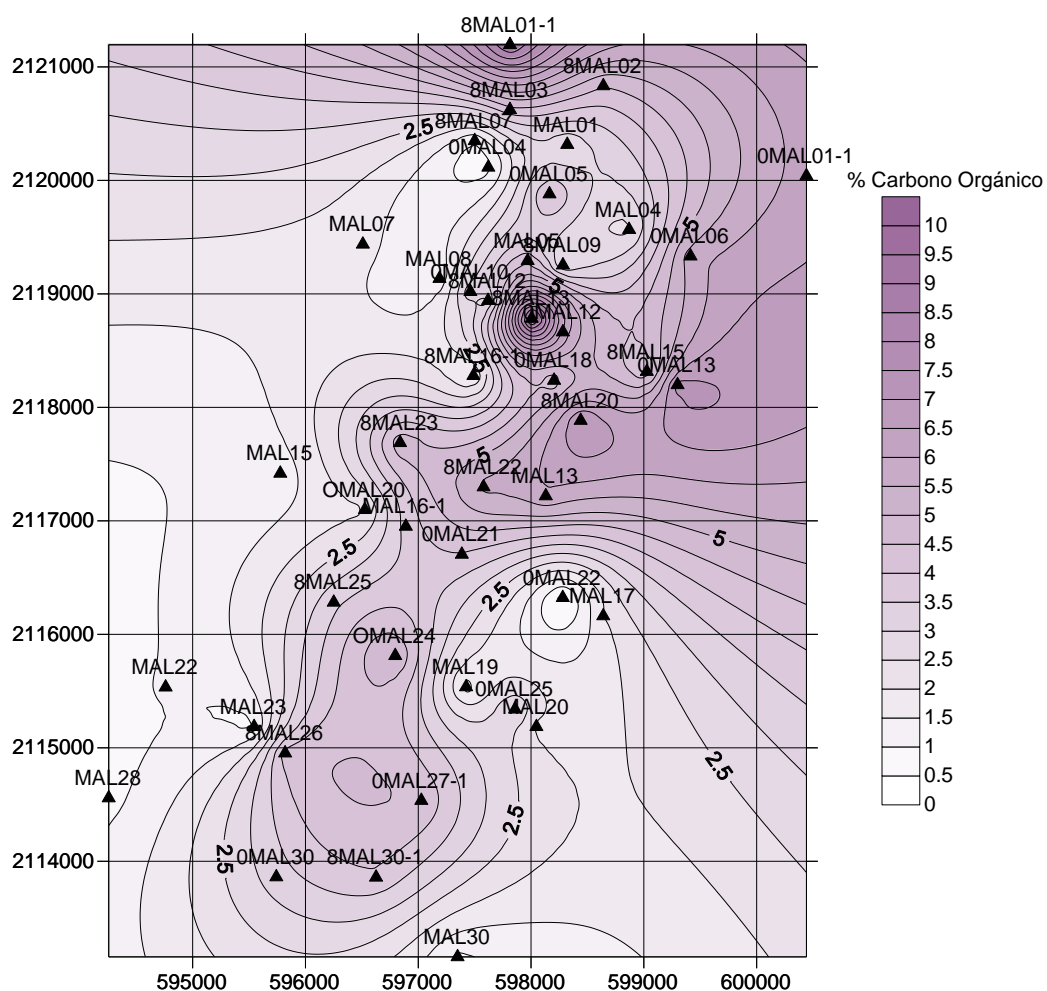
La prueba estadística que se realizó para las determinaciones de materia orgánica y carbono orgánico, se discute a continuación.

En el análisis estadístico de las medias del porcentaje de materia orgánica, con base en la prueba ANOVA, se encontró que al menos una de las medias de alguno de los tres bloques estudiados era diferente (Cuadro V.37 y Cuadro V.38).

**Cuadro V.36.** Comparación del porcentaje de carbono orgánico de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Carbono Orgánico (%)</b>	<b>Muestra</b>	<b>Carbono Orgánico (%)</b>	<b>Muestra</b>	<b>Carbono Orgánico (%)</b>
0MAL01-1	6.18	8MAL01-1	9.15	MAL01	2.59
0MAL04	0.83	8MAL02	4.52	MAL04	2.36
0MAL05	4.11	8MAL03	4.34	MAL05	4.38
0MAL06	5.79	8MAL07	1.03	MAL07	1.73
0MAL10	3.45	8MAL09	2.47	MAL08	1.05
0MAL12	6.35	8MAL12	2.79	MAL13	5.91
0MAL13	7.18	8MAL13	10.42	MAL15	1.24
0MAL18	4.16	8MAL15	4.05	MAL16-1	3.67
0MAL20	1.94	8MAL16-1	1.45	MAL17	1.99
0MAL21	3.97	8MAL20	7.08	MAL19	1.28
0MAL22	0.31	8MAL22	5.60	MAL20	1.88
0MAL24	5.05	8MAL23	4.85	MAL22	1.06
0MAL25	3.03	8MAL25	3.36	MAL23	0.80
0MAL27-1	4.43	8MAL26	4.23	MAL28	0.64
0MAL30	3.26	8MAL30-1	3.91	MAL30	0.91
Promedio	4.00	Promedio	4.61	Promedio	2.10





**Figura V.31.** Cambio espacial del % de carbono orgánico de los suelos

**Cuadro V.37.** ANOVA de una entrada del porcentaje de materia orgánica.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Factor	2	153.3	76.7	5.98	0.005
Error	42	538.1	12.8		
Total	44	691.4			

**Cuadro V.38.** Estadísticos descriptivos del porcentaje de materia orgánica.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
8MAL	15	7.957	4.488
OMAL	15	6.902	3.407
MAL	15	3.622	2.585

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

OMAL = Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque

La prueba de Fisher mostró que al comparar los valores de las medias del porcentaje de materia orgánica en los bloques 8MAL y OMAL, no existen diferencias significativas entre sí. Al hacer la comparación de 8MAL con MAL resultó que sí hay diferencia entre las medias de ambos bloques. Por último, en la comparación de OMAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques también son significativamente distintas (Cuadro V.39).

**Cuadro V.39.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95% del porcentaje de materia orgánica.

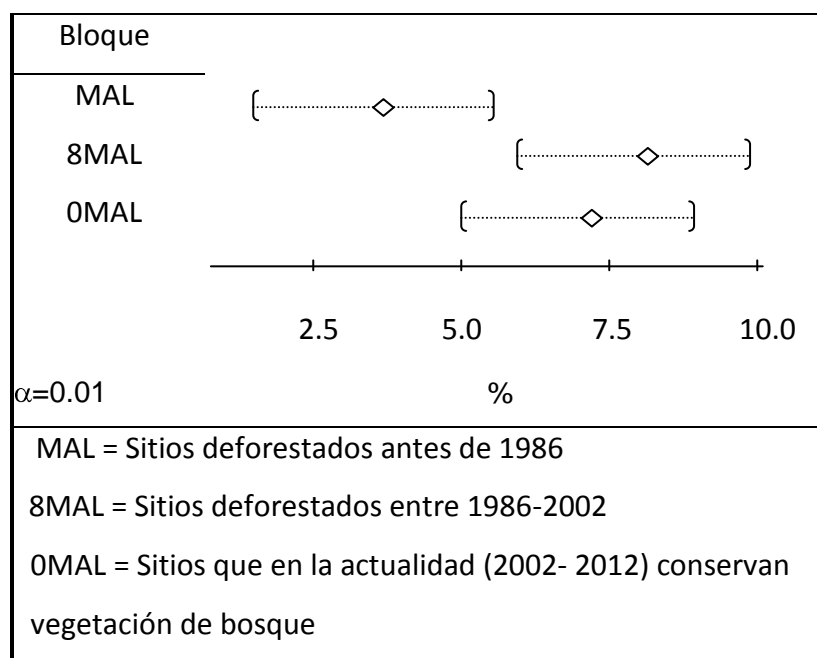
Factor 8MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
OMAL	-3.692	-1.055	1.583
MAL	-6.972	-4.335	-1.697

Factor OMAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	-5.918	-3.280	-0.642

La figura V.32, muestra un gráfico descriptivo de los resultados del porcentaje de materia orgánica encontrados en el análisis estadístico.



**Figura V.32** Gráfico descriptivo de las medias del porcentaje de Materia Orgánica para los diferentes bloques de estudio

El análisis estadístico para el porcentaje de carbono orgánico sigue el mismo patrón que el porcentaje de materia orgánica. La prueba ANOVA señaló que al menos una de las medias de alguno de los bloques estudiados era distinta (Cuadro V.40 y Cuadro V.41).

**Cuadro V.40.** ANOVA de una entrada del porcentaje de carbono orgánico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Factor	2	50.74	25.37	5.92	0.005
Error	42	180.08	4.29		
Total	44	230.82			

**Cuadro V.41.** Estadísticos descriptivos del porcentaje de carbono orgánico.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
8MAL	15	4.617	2.602
0MAL	15	4.003	1.975
MAL	15	2.121	1.480

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

0MAL = Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque

En la prueba de comparaciones múltiples de Fisher se encontró que al compararon los bloques 8MAL con 0MAL no existen diferencias significativas entre las medias de los valores del porcentaje de carbono orgánico. Al comparar 8MAL con MAL resultó que sí hay diferencia entre las medias de ambos bloques. Por último, en la comparación de 0MAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques también son distintas significativamente (Cuadro V.42).

**Cuadro V.42.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95% del porcentaje de carbono orgánico.

Factor 8MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
0MAL	-2.140	-0.614	0.912
MAL	-4.022	-2.496	-0.970

Factor 0MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	-3.408	-1.882	-0.356

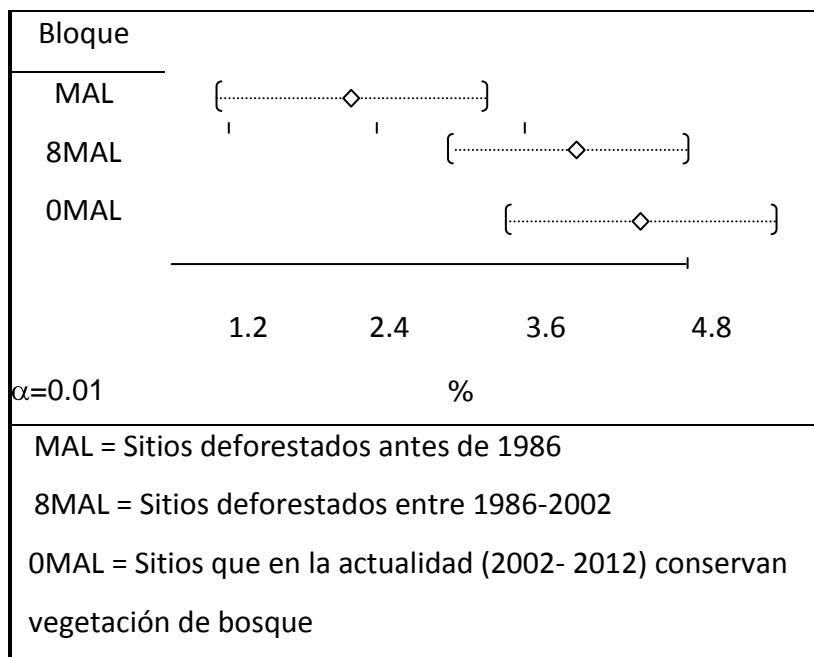
La figura V.33, muestra un gráfico descriptivo de los resultados encontrados en el análisis estadístico.

Los resultados son compatibles con lo encontrado en otros estudios. La pérdida de materia orgánica es ocasionada por la falta de un aporte permanente de desechos vegetales (litter) y el aumento de la temperatura y de la evapotranspiración del suelo, efectos que se originan por la falta de la protección que proporciona una cobertura vegetal (Valera, 1994). Adachi (1973), en suelos de Japón, ya reportó que el humus contenido en

esta clase de suelos disminuye por el cambio de uso, de forestal al agrícola. Gibbs (1968), reporta para Nueva Zelanda, que la mayoría de los suelos derivados de materiales piroclásticos tienen una cubierta húmica y sus rangos en contenido de carbono van de 3.5 a 11.6 % (promedio de 9 %) en 15 suelos representativos.

El mecanismo de acumulación de carbono orgánico en los suelos derivados de materiales piroclásticos ha llamado la atención de muchos investigadores. En una revisión de Wada y Higashi (1976), se sugirió primero que la interacción de humus-minerales, especialmente la interacción vidrios volcánicos y Alófanos - humus, era importante en vista de una probable protección del humus contra el ataque de microorganismos.

Finalmente, el que no exista diferencia significativa en los contenidos en materia orgánica y carbono orgánico entre de los suelos de los sitios deforestados entre 1986-2002 (8MAL) y los suelos de los sitios que en la actualidad conservan vegetación de bosque (OMAL), refuerza la idea sobre la alta capacidad amortiguadora o resiliente de éstos.



**Figura V.33.** Gráfico descriptivo de las medias del porcentaje de carbono orgánico para los diferentes bloques de estudio

**V.5.4.2. Porcentaje de nitrógeno total.** En la mayoría de los suelos cultivados, la capa arable contiene entre 0.02 y 0.4% de su peso en nitrógeno (Valera, 1994); Meurisse (1985) reporta como contenidos característicos en nitrógeno total entre 0.01 y 0.5 % para suelos forestales derivados de materiales piroclásticos del Pacífico Noroeste

de U.S.A.; Aguilera (1989) reporta que los contenidos característicos de nitrógeno total en suelos volcánicos mexicanos, como los de la región de la Malinche, varían entre 0.01 y 0.85%.

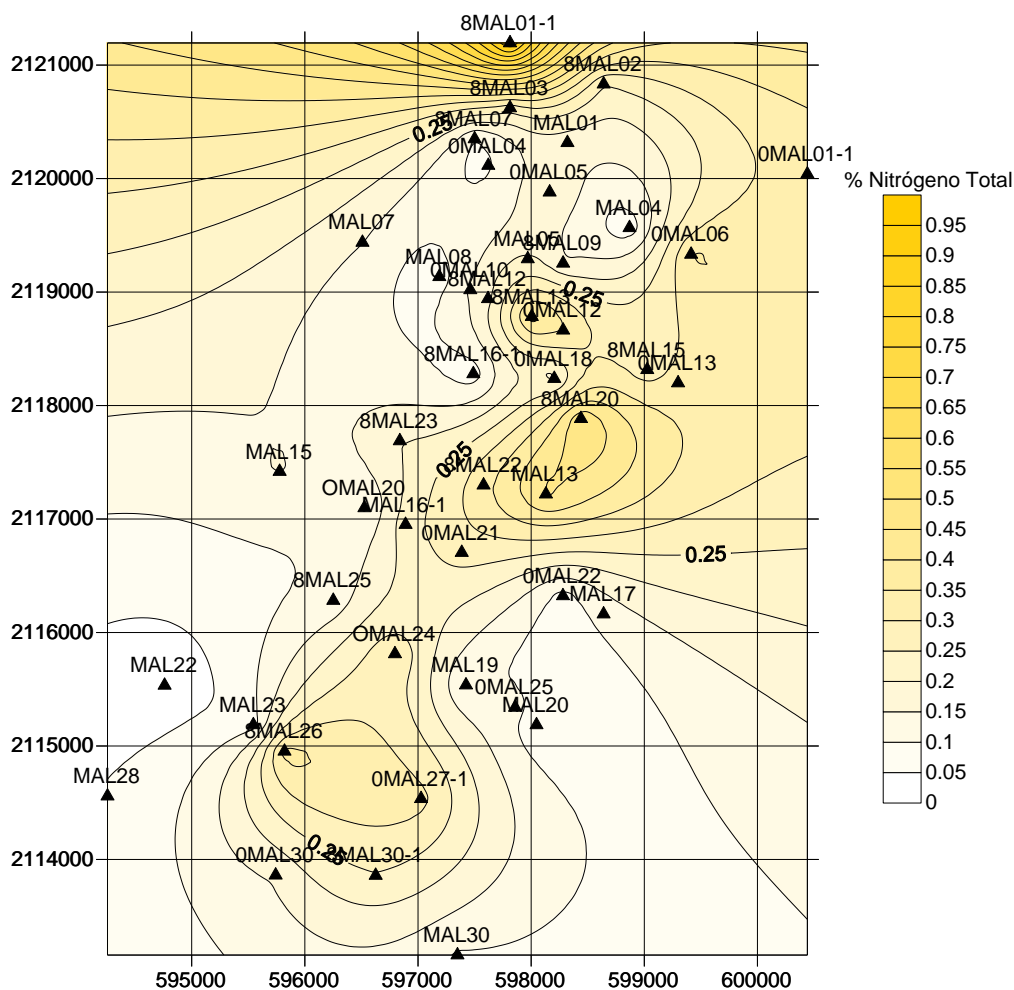
**Cuadro V.43.** Comparación del porcentaje de nitrógeno total de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>N Total (%)</b>	<b>Muestra</b>	<b>N Total (%)</b>	<b>Muestra</b>	<b>N Total (%)</b>
OMAL01-1	0.31	8MAL01-1	0.95	MAL01	0.18
OMAL04	0.10	8MAL02	0.25	MAL04	0.07
OMAL05	0.20	8MAL03	0.27	MAL05	0.21
OMAL06	0.35	8MAL07	0.10	MAL07	0.15
OMAL10	0.16	8MAL09	0.15	MAL08	0.08
OMAL12	0.35	8MAL12	0.18	MAL13	0.46
OMAL13	0.32	8MAL13	0.42	MAL15	0.15
OMAL18	0.18	8MAL15	0.27	MAL16-1	0.23
OMAL20	0.10	8MAL16-1	0.08	MAL17	0.12
OMAL21	0.27	8MAL20	0.49	MAL19	0.10
OMAL22	0.08	8MAL22	0.33	MAL20	0.06
OMAL24	0.29	8MAL23	0.20	MAL22	0.03
OMAL25	0.12	8MAL25	0.12	MAL23	0.08
OMAL27-1	0.32	8MAL26	0.37	MAL28	0.05
OMAL30	0.16	8MAL30-1	0.25	MAL30	0.10
Promedio	0.22	Promedio	0.29	Promedio	0.14

Los resultados de porcentaje de nitrógeno de las muestras tomadas en la Malinche se muestran en el cuadro V.43 y en la figura V.34.

En este cuadro se puede apreciar que los valores de porcentaje de nitrógeno total varían para el bloque MAL de 0.03% en MAL22 a 0.46% en MAL13, siendo el promedio de 0.13%. Para el bloque OMAL los porcentajes van de 0.08% (8MAL16-1) a 0.95% (8MAL01-1). Nótese que el porcentaje de nitrógeno total en 8MAL01-1 es un poco más alto del valor máximo considerado para los suelos derivados de materiales volcánicos, sin embargo, el promedio para este bloque es de 0.29%.

Con respecto al bloque OMAL, los porcentajes de nitrógeno total van de 0.02% en OMAL22 a 0.35% en OMAL06 y OMAL12. El valor medio resulta de 0.22%.



**Figura V.34.** Cambio espacial del % de nitrógeno total de los suelos.

El análisis estadístico de las medias para los diferentes bloques de estudio, con base en la prueba ANOVA indicó que, al menos una de las medias de alguno de los tres bloques estudiados era diferente (Cuadro V.44 y cuadro V.45).

De la prueba de comparaciones múltiples de Fisher resultó que, no existen diferencias significativas entre las medias de los valores del porcentaje de nitrógeno total para los bloques 8MAL y OMAL. Resultó también que, al comparar 8MAL con MAL sí hay diferencia entre las medias de ambos bloques. Por último, en la comparación de OMAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques no son distintas significativamente (Cuadro V.46).

**Cuadro V.44.** ANOVA de una entrada del porcentaje de nitrógeno total.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Valor P</b>
Factor	2	0.1858	0.0929	4.11	0.023
Error	42	0.9493	0.0226		
Total	44	1.1351			

**Cuadro V.45.** Estadísticos descriptivos del porcentaje de nitrógeno total.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
8MAL	15	0.2953	0.2160
0MAL	15	0.2207	0.0989
MAL	15	0.1380	0.1067

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

0MAL = Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque

**Cuadro V.46.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % del porcentaje de nitrógeno total.

Factor 8MAL se sustrae de:

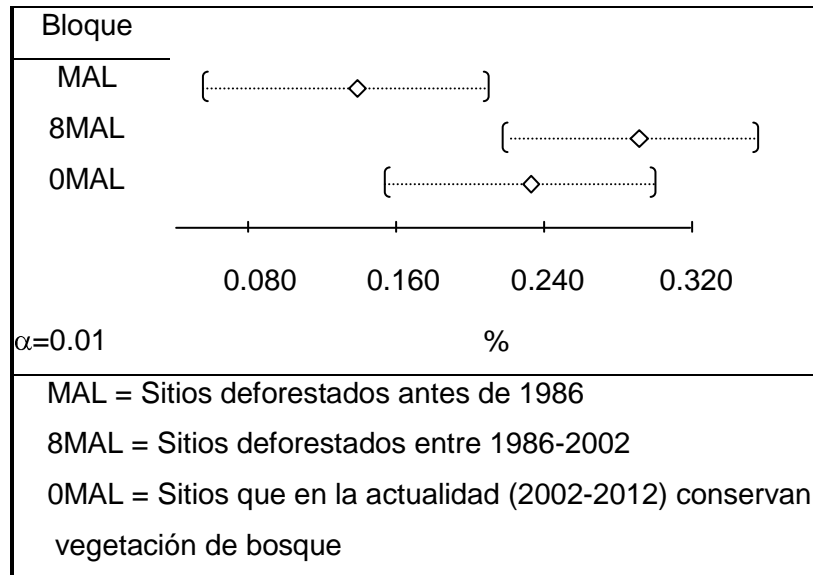
Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
0MAL	-0.1855	-0.0747	0.0361
MAL	-0.2681	-0.1573	-0.0465

Factor 0MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	-0.1935	-0.0827	0.0281

La figura V.35, es un gráfico descriptivo de los resultados encontrados en el análisis estadístico.





**Figura V.35.** Gráfico descriptivo de las medias del porcentaje de nitrógeno total para los diferentes bloques de estudio.

Del análisis estadístico solo podemos concluir que el contenido en nitrógeno total de los suelos de los sitios deforestados entre 1986-2002 (8MAL) y el de los sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque (0MAL) es significativamente diferente. Esto puede ser atribuido en primera instancia al hecho de que los sitios que conservan su vegetación forestal también conservan la capa de litter y por consiguiente diferentes condiciones para la acumulación de nitrógeno orgánico y su consecuente mineralización por parte de los microorganismos del suelo.

El nitrógeno es necesario para la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos heterótrofos del suelo y si el material orgánico que se descompone tiene poco nitrógeno en relación al carbono presente, los microorganismos utilizan el amonio o nitratos presentes en el terreno (Pritchett, 1986).

Debido a que las bacterias construyen su protoplasma celular con 8 a 10 moléculas de carbono por cada molécula de nitrógeno, al no existir suficiente nitrógeno para el proceso de síntesis celular, los microorganismos recurren al nitrógeno mineral ( $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NO}_3^+$ ) del suelo para continuar su proceso de utilizar a los residuos como fuente de energía (Castellanos *et al.*, 2000). Este nitrógeno permite el rápido crecimiento de los microorganismos que proporcionan material con carbono al suelo (Pritchett, 1986).

El nitrógeno se acumula en los suelos en forma de residuos vegetales y animales, y sobre cada lugar se establece una especie de equilibrio entre la tasa de acumulación y de descomposición en periodos largos. El nitrógeno total en los suelos se encuentra sobre

todo en la capa de humus de la cubierta vegetal y en el horizonte A. En climas fríos la acumulación de nitrógeno se ve favorecida por la gran cantidad de humedad del suelo durante gran parte del año. Las tasas de mineralización en los suelos ácidos son sumamente bajas en los bosques. La alteración del suelo, tal como ocurre en las operaciones de labranza, por lo general aumentan el ritmo de descomposición de la materia orgánica y la liberación de nitrógeno. Los aumentos de temperatura del suelo después del desmonte también estimulan la nitrificación.

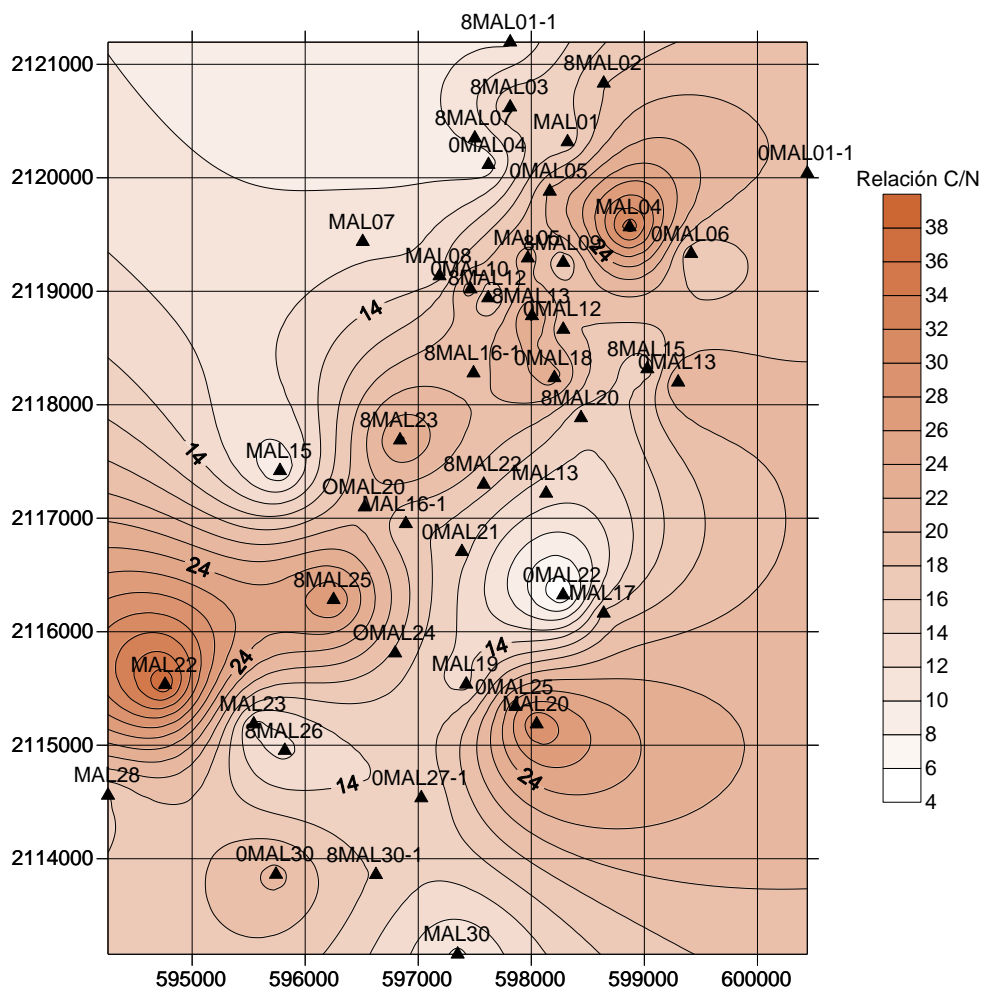
**V.5.4.3. Relación C/N.** La relación C/N es un parámetro muy utilizado en la caracterización del nitrógeno y sus relaciones con la materia orgánica del suelo (Valera, 1994). El nitrógeno de los materiales orgánicos queda disponible para las plantas superiores solamente después de que la relación C/N se aproxima al valor de 10 (Pritchett, 1986), finalmente las relaciones C/N son valiosas para conocer los balances de oxidación y nitrificación de los suelos (Aguilera, 1989).

Cuadro V.47. Comparación de la relación C/N de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Relación C/N</b>	<b>Muestra</b>	<b>Relación C/N</b>	<b>Muestra</b>	<b>Relación C/N</b>
OMAL01-1	19.71	8MAL01-1	19.60	MAL01	14.67
OMAL04	08.72	8MAL02	17.93	MAL04	33.74
OMAL05	20.37	8MAL03	15.97	MAL05	20.98
OMAL06	16.35	8MAL07	10.51	MAL07	11.46
OMAL10	21.78	8MAL09	16.00	MAL08	13.21
OMAL12	18.07	8MAL12	15.08	MAL13	12.94
OMAL13	22.20	8MAL13	24.64	MAL15	08.13
OMAL18	23.05	8MAL15	14.90	MAL16-1	16.19
OMAL20	19.75	8MAL16-1	19.13	MAL17	16.49
OMAL21	14.61	8MAL20	14.36	MAL19	13.28
OMAL22	03.89	8MAL22	16.72	MAL20	29.88
OMAL24	17.67	8MAL23	24.39	MAL22	37.89
OMAL25	25.46	8MAL25	28.24	MAL23	10.17

OMAL27-1	14.05	8MAL26	11.51	MAL28	12.05
OMAL30	20.77	8MAL30-1	15.85	MAL30	09.54
Promedio	17.76	Promedio	16.99	Promedio	17.73

La cantidad de materia orgánica y de nitrógeno en el suelo en un momento determinado, depende de muchos factores climáticos y edáficos así como de las perturbaciones naturales y humanas que influyen en la relación entre las adiciones de residuos animales y vegetales (entrada) y la tasa de descomposición (salida) (Pritchett, 1986). Durante la mineralización de los materiales carbonáceos, como el litter de la cubierta forestal, la relación C/N disminuye con el tiempo. Esto se debe a la pérdida del carbono en forma gaseosa en tanto que el nitrógeno permanece inmovilizado en los compuestos orgánicos. Si el residuo de partida es rico en carbono y pobre en nitrógeno, la fermentación será lenta, las temperaturas no serán altas y el carbono se perderá en forma de dióxido de carbono. Para el caso contrario, en altas concentraciones relativas de nitrógeno, éste se transformará en amoníaco, impidiendo la correcta actividad biológica. El humus en los suelos derivados de materiales piroclásticos es característico por una relación C/N amplia y comúnmente hay valores arriba de 13. En México las relaciones C/N reportadas para este tipo de suelos varían entre 8 y 13 (Valera, 1994).



**Figura V.36.** Cambio espacial de la relación C/N de los suelos.

Los resultados de la relación C/N para los suelos estudiados en este trabajo se muestran en el cuadro V.47, donde se puede apreciar que para el bloque MAL, hay valores que van de 8.13 hasta 37.89, con un promedio de 17.73. El bloque 8MAL tiene un valor mínimo de relación C/N de 9.60 y un máximo de 28.24, mientras que la media es de 16.99. Finalmente, para el bloque 0MAL la relación C/N mínima la representa la muestra 0MAL22 con 3.89 y la máxima es 23.05 en 0MAL18. El promedio para este bloque es de 17.76. La figura V.36 muestra el cambio espacial de la relación C/N de los suelos.

De acuerdo con el análisis estadístico basado en la prueba ANOVA, no hay diferencias significativas en las medias de los tres bloques de estudio para la propiedad de la relación C/N (Ver cuadros V.48 y V.49).

**Cuadro V.48.** ANOVA de una entrada de la relación C/N.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Valor P</b>
Factor	2	5.7	2.9	0.06	0.941
Error	42	1973.7	47.0		
Total	44	1979.5			

**Cuadro V.49.** Estadísticos descriptivos de la relación C/N.

<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
8MAL	15	16.989	5.280
0MAL	15	17.763	5.648
MAL	15	17.727	9.011

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

0MAL = Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque

La prueba de comparaciones múltiples de Fisher confirma lo encontrado en la prueba ANOVA, no hay diferencias significativas entre las medias de los tres bloques de estudio (Cuadro V.50).

**Cuadro V.50.** Intervalos de confianza para la prueba de comparaciones múltiples de Fisher al 95 % de la relación C/N.

Factor 8MAL se sustrae de:

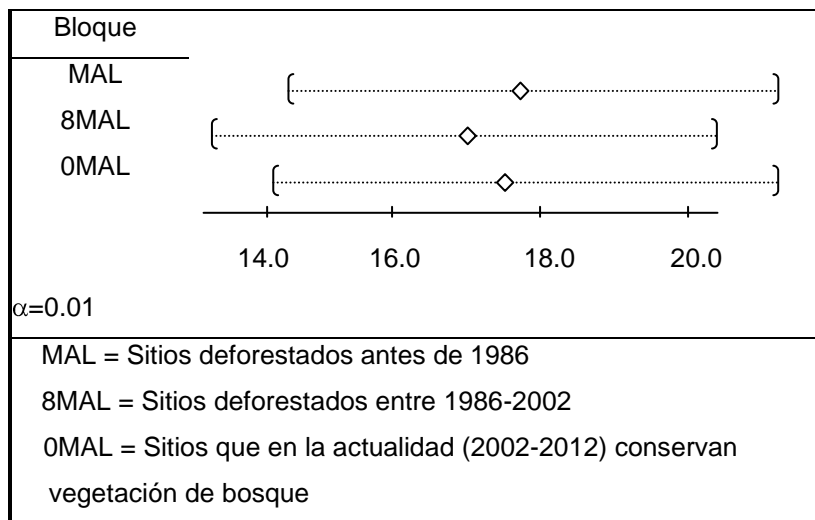
Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
0MAL	-4.277	0.775	5.826
MAL	-4.313	0.739	5.790

Factor 0MAL se sustrae de:

Factor	Límite inferior	Centro	Límite superior
MAL	-5.088	-0.036	5.016

La figura V.37, muestra un gráfico descriptivo de los resultados encontrados en el análisis estadístico.

La interpretación de estos resultados es que esencialmente los suelos conservan sus balances de oxidación y nitrificación y las condiciones que relacionan al nitrógeno con la materia orgánica del suelo.



**Figura V.37.** Gráfico descriptivo de las medias de la relación C:N para los diferentes bloques de estudio

**V.5.4.4. Grado de humificación.** El coeficiente E4/E6 (Absorbancias a 465 y 665 nm) indica el grado de humificación de los ácidos húmicos, si los coeficientes E4/E6 son los más bajos indican una mayor condensación aromática.

**Cuadro V.51.** Comparación de la relación E4/E6 grado de humificación de los suelos.

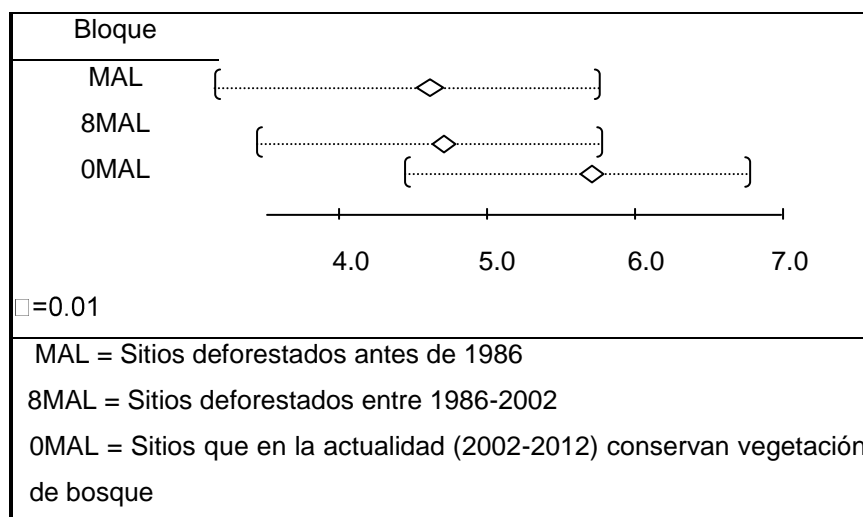
<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Relación E4/E6</b>	<b>Muestra</b>	<b>Relación E4/E6</b>	<b>Muestra</b>	<b>Relación E4/E6</b>
OMAL01-1	03.95	8MAL01-1	05.20	MAL01	04.38
OMAL04	04.75	8MAL02	04.51	MAL04	04.66
OMAL05		8MAL03	03.25	MAL05	03.88
OMAL06	04.19	8MAL07	03.08	MAL07	05.70
OMAL10	03.49	8MAL09	04.38	MAL08	03.50
OMAL12	06.03	8MAL12	04.68	MAL13	04.42
OMAL13		8MAL13	04.66	MAL15	04.87

OMAL18	05.33	8MAL15	04.76	MAL16-1	03.56
OMAL20	14.70	8MAL16-1	02.58	MAL17	05.05
OMAL21	04.98	8MAL20	03.13	MAL19	03.78
OMAL22	02.93	8MAL22	04.75	MAL20	04.44
OMAL24	04.14	8MAL23	04.72	MAL22	04.22
OMAL25	04.54	8MAL25	13.41	MAL23	04.68
OMAL27-1	04.34	8MAL26	05.14	MAL28	02.92
OMAL30	06.59	8MAL30-1	04.49	MAL30	10.00
Promedio	04.70	Promedio	04.85	Promedio	04.08

A mayor coeficiente E4/E6 menor tamaño y menor peso molecular de los ácidos húmicos. Los resultados del grado de humificación de las muestras tomadas en la Malinche se muestran en el cuadro V.51.

**Cuadro V.52.** ANOVA de una entrada de Relación E4/E6 grado de humificación.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Factor	2	0.9596	0.9596	0.64	0.533
Error	37	27.7564	27.7564		
Total	39	28.7160			



**Figura V.38.** Gráfico descriptivo de las medias de la Relación E4/E6 Grado de Humificación para los diferentes bloques de estudio

De acuerdo con el análisis estadístico basado en la prueba ANOVA, no hay diferencias significativas en las medias de los tres bloques de estudio para la propiedad del grado de humificación (Ver cuadro V.52 y figura V.38).

**V.5.4.5. Índice melánico.** El coeficiente E4/E5 (Absorbancias a 450 y 520 nm) indica el índice melánico de los ácidos húmicos, si los coeficientes E4/E5 es menor de 1.7 indica una alta melanización.

**Cuadro V.53.** Comparación de la relación E4/E5 índice melánico de los suelos.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Relación E4/E5</b>	<b>Muestra</b>	<b>Relación E4/E5</b>	<b>Muestra</b>	<b>Relación E4/E5</b>
OMAL01-1	1.62	8MAL01-1	1.76	MAL01	1.70
OMAL04	1.70	8MAL02	1.67	MAL04	1.68
OMAL05	1.70	8MAL03	1.56	MAL05	1.60
OMAL06	1.67	8MAL07	1.44	MAL07	1.81
OMAL10	1.50	8MAL09	1.65	MAL08	1.46
OMAL12	1.77	8MAL12	1.64	MAL13	1.68
OMAL13	1.70	8MAL13	1.65	MAL15	1.69
OMAL18	1.75	8MAL15	1.68	MAL16-1	1.64
OMAL20	2.04	8MAL16-1	1.28	MAL17	1.92
OMAL21	1.71	8MAL20	1.41	MAL19	1.69
OMAL22	1.56	8MAL22	1.68	MAL20	1.70
OMAL24	1.63	8MAL23	1.69	MAL22	1.64
OMAL25	1.67	8MAL25	1.59	MAL23	1.82
OMAL27-1	1.68	8MAL26	1.67	MAL28	1.56
OMAL30	1.86	8MAL30-1	1.68	MAL30	3.00
Promedio	1.70	Promedio	1.60	Promedio	1.68

Los resultados del índice melánico de las muestras tomadas en la Malinche se muestran en el cuadro V.53.



Al analizar los resultados de la prueba ANOVA, el resultado es significativo al nivel del 10% ya que el valor de p es 0.088, luego se rechaza la hipótesis de igualdad de las medias (Ver cuadros V.54 y V.55).

**Cuadro V.54.** ANOVA de una entrada de la relación E4/E5 índice melánico de los suelos.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Valor P</b>
Factor	2	0.0826	0.0413	2.58	0.088
Error	39	0.6237	0.0160		
Total	41	0.7062			

**Cuadro V.55.** Estadísticos de la relación E4/E5 índice melánico de los suelos.

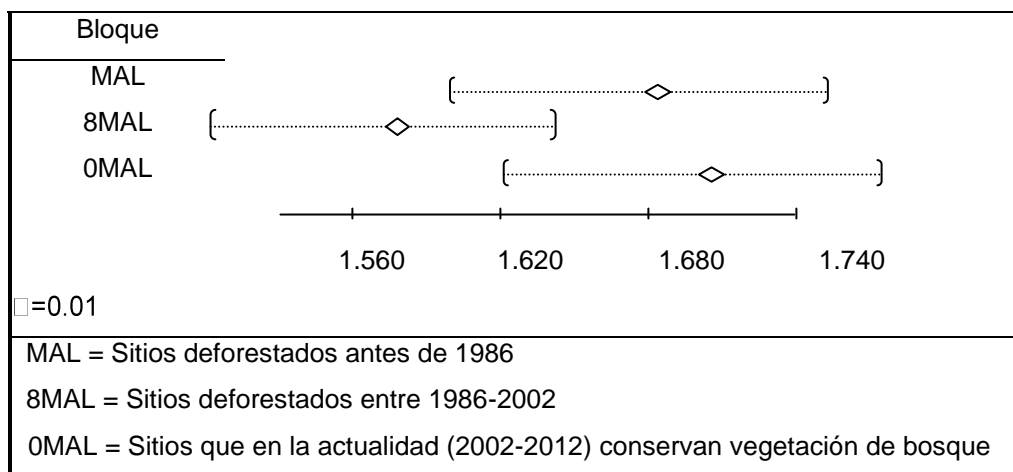
<b>Nivel</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>
8MAL	15	1.7046	0.1359
0MAL	15	1.6033	0.1295
MAL	15	1.6850	0.1134

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

0MAL = Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque

Aplicando la prueba de comparaciones múltiples de Fisher, resultó que las medias de los valores de la Relación E5/E6 índice melánico para los bloques 8MAL y 0MAL son significativamente distintas. La misma tendencia prevalece al comparar 8MAL con MAL, es decir, existe diferencia al nivel de significación del 10% entre las medias de ambos bloques. Finalmente, en la comparación de 0MAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques no son diferentes de manera significativa (Figura V.39).



**Figura V.39.** Gráfico descriptivo de las medias de la Relación E4/E5 Índice melánico para los diferentes bloques de estudio.

**V.5.4.6. Umbral de coagulación.** A mayor umbral de coagulación menor peso molecular de los ácidos húmicos. Los resultados del umbral de coagulación a las 2 horas de las muestras tomadas en la Malinche se muestran en el cuadro V.56. Al analizar los resultados de la prueba ANOVA, el resultado es significativo al nivel del 10% ya que el valor de p es 0.088, luego se rechaza la hipótesis de igualdad de las medias (Ver Cuadros V.57 y V.58).

**Cuadro V.56.** Umbral de coagulación a las 2 horas.

Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque		Sitios deforestados entre 1986-2002		Sitios deforestados antes de 1986	
Muestra	Coagulación 2 Horas	Muestra	Coagulación 2 Horas	Muestra	Coagulación 2 Horas
0MAL01-1	0.20	8MAL01-1	0.30	MAL01	0.17
0MAL04	0.30	8MAL02	0.20	MAL04	0.20
0MAL05	0.18	8MAL03	0.10	MAL05	0.20
0MAL06	0.20	8MAL07	0.16	MAL07	0.20
0MAL10	0.18	8MAL09	0.15	MAL08	0.30
0MAL12	0.17	8MAL12	0.10	MAL13	0.17
0MAL13	0.17	8MAL13	0.18	MAL15	0.20
0MAL18	0.20	8MAL15	0.30	MAL16-1	0.18
0MAL20	0.20	8MAL16-1	0.30	MAL17	0.30

OMAL21	0.17	8MAL20	0.30	MAL19	0.30
OMAL22	0.30	8MAL22	0.17	MAL20	0.20
OMAL24	0.30	8MAL23	0.20	MAL22	0.20
OMAL25	0.20	8MAL25	0.20	MAL23	0.30
OMAL27-1	0.20	8MAL26	0.17	MAL28	0.30
OMAL30	0.20	8MAL30-1	0.10	MAL30	0.30
Promedio	0.21	Promedio	0.20	Promedio	0.24

**Cuadro V.57.** ANOVA de una entrada de umbral de coagulación a las 2 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Factor	2	0.01159	0.00580	1.66	0.203
Error	42	0.14681	0.00350		
Total	44	0.15840			

**Cuadro V.58.** Estadísticos de umbral de coagulación a las 2 horas.

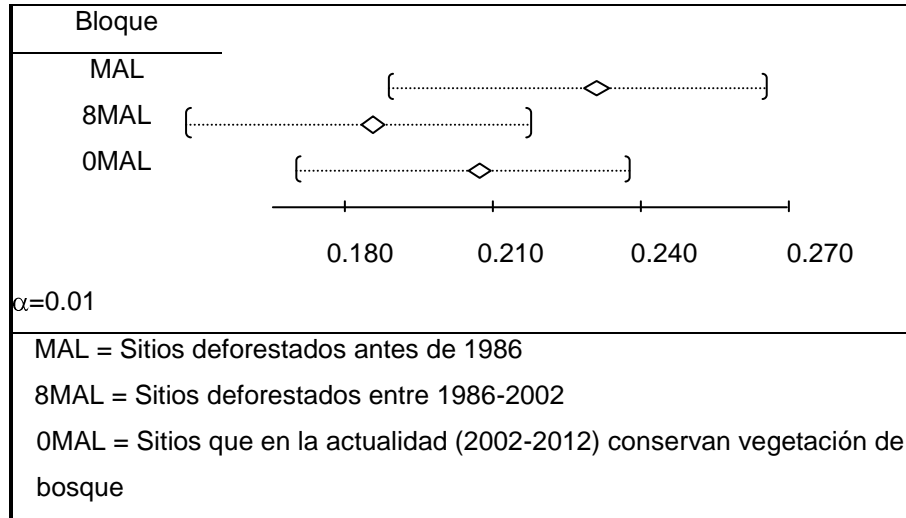
Nivel	N	Media	Desviación Estándar
8MAL	15	0.21333	0.04592
OMAL	15	0.19667	0.07326
MAL	15	0.23583	0.05487

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

OMAL = Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque

Aplicando la prueba de comparaciones múltiples de Fisher, resultó que las medias de los valores del umbral de coagulación a las 2 horas para los bloques 8MAL y 0MAL no son significativamente distintas. La misma tendencia prevalece al comparar 0MAL con MAL, es decir, tampoco hay diferencia entre las medias de ambos bloques (Figura V.40). Finalmente, en la comparación de 8MAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques sí son diferentes de manera significativa (al nivel de significación del 10%).



**Figura V.40.** Gráfico descriptivo de las medias del umbral de coagulación a las 2 horas para los diferentes bloques de estudio.

Los resultados del umbral de coagulación a las 4 horas de las muestras tomadas en la Malinche se muestran en el cuadro V.59. Al analizar los resultados de la prueba ANOVA, el resultado es significativo al nivel del 1% ya que el valor de p es 0.000, luego se rechaza la hipótesis de igualdad de las medias (Cuadros V.60 y V.61).

**Cuadro V.59.** Umbral de coagulación a las 4 horas.

<b>Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque</b>		<b>Sitios deforestados entre 1986-2002</b>		<b>Sitios deforestados antes de 1986</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Coagulación 4 Horas</b>	<b>Muestra</b>	<b>Coagulación 4 Horas</b>	<b>Muestra</b>	<b>Coagulación 4 Horas</b>
OMAL01-1	0.13	8MAL01-1	0.10	MAL01	0.13
OMAL04	0.20	8MAL02	0.13	MAL04	0.13
OMAL05	0.13	8MAL03	0.07	MAL05	0.13
OMAL06	0.13	8MAL07	0.07	MAL07	0.13
OMAL10	0.17	8MAL09	0.08	MAL08	0.18
OMAL12	0.50	8MAL12	0.07	MAL13	0.50
OMAL13	0.50	8MAL13	0.07	MAL15	0.13
OMAL18	0.13	8MAL15	0.08	MAL16-1	0.13
OMAL20	0.16	8MAL16-1	0.20	MAL17	0.18

OMAL21	0.15	8MAL20	0.07	MAL19	0.18
OMAL22	0.16	8MAL22	0.05	MAL20	0.13
OMAL24	0.15	8MAL23	0.13	MAL22	0.13
OMAL25	0.13	8MAL25	0.13	MAL23	0.18
OMAL27-1	0.13	8MAL26	0.50	MAL28	0.18
OMAL30	0.13	8MAL30-1	0.07	MAL30	0.18
Promedio	0.15	Promedio	0.10	Promedio	0.16

**Cuadro V.60.** ANOVA de una entrada de umbral de coagulación a las 4 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Factor	2	0.023720	0.011860	13.34	0.000
Error	35	0.031120	0.000889		
Total	37	0.054840			

**Cuadro V.61.** Estadísticos de umbral de coagulación a las 4 horas.

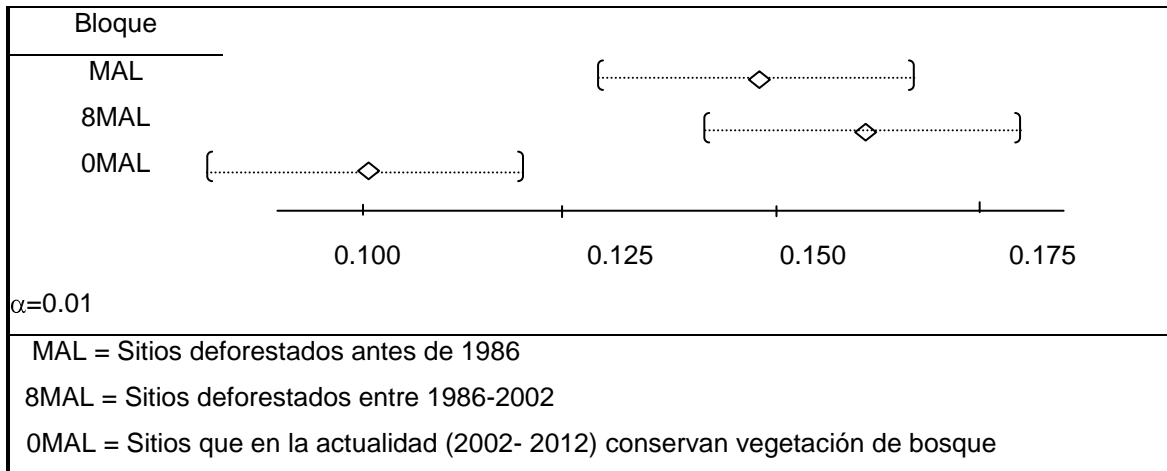
Nivel	N	Media	Desviación Estándar
8MAL	15	0.15000	0.02092
OMAL	15	0.10288	0.03892
MAL	15	0.15893	0.02568

MAL = Sitios deforestados antes de 1986

8MAL = Sitios deforestados entre 1986-2002

OMAL = Sitios que en la actualidad (2002-2012) conservan vegetación de bosque

Al aplicar la prueba de comparaciones múltiples de Fisher, se verificó que entre los bloques 8MAL y OMAL existen diferencias significativas de las medias del umbral de coagulación de las muestras de los tres bloques. Al comparar 8MAL con MAL resultó que sí hay diferencia entre las medias de ambos bloques. Por último, en la comparación de OMAL con MAL se pudo ver que las medias de los dos bloques no son distintas significativamente (Figura V.41).



**Figura V. 41.** Gráfico descriptivo de las medias del umbral de coagulación a las 4 horas para los diferentes bloques de estudio

### V.5.5. Discusión final sobre la Calidad de Carbono secuestrado.

En los suelos de la zona del Volcán La Malinche, en particular el bosque, que en la actualidad tiene vegetación forestal nativa, no permite la presencia de muchas bacterias que podrían mineralizar la materia orgánica, dominando la presencia de hongos, ya que persiste una condición reductora de acuerdo con el valor del potencial redox, debido a la cubierta de litter y a la alta humedad que se mantiene bajo las hojas. La calidad de carbono secuestrado, de acuerdo a la clasificación de Kumada (1987), es de tipo P con máximos contenidos totales.

Cuando se deforesta, como en el caso de la zona agrícola, cambia el potencial redox a oxidante, y cambian también las poblaciones de microorganismos del suelo. Al aumentar la actividad biológica aumenta la concentración de ácidos húmicos tipo A y B, disminuye la reserva de carbono aunque su disminución estadísticamente no es significativa. Pero una vez que se ha consumido por parte de los microorganismos el sustrato orgánico de origen forestal original, se retorna a una condición de ácidos húmicos tipo P (Valera *et al.*, 2014).

Considerando que las zonas de agricultura y plantación se deforestaron hace aproximadamente 28 años (Valera *et al.*, 2009), y que la zona de plantación se comenzó a reforestar hace 8 años; se puede suponer que el comportamiento del suelo, respecto a las áreas que hayan sido recién taladas, es decir 16 años atrás, es positivo en cuanto al

aprovechamiento de los nutrimentos y el secuestro de carbono, como lo explica Valera (2009), ya que los suelos muestran una resiliencia buena. Sin embargo cuando se sobrepasa la capacidad de carga del sistema, no es posible seguir amortiguando los cambios y empiezan a ocurrir modificaciones de las propiedades del suelo, esto último se podría presentar en la zona agrícola actualmente que fue deforestada hace más de 16 años.

En cuanto al comportamiento del carbono en cada una de las zonas, y analizando los resultados de Llaguno (2007), los suelos deforestados antes de 1986 secuestran alrededor de 36.06 ton/ha y emitían 23.76 ton/ha, sin embargo hay que tomar en cuenta que los datos son de hace aproximadamente 7 años, y el suelo de esas áreas podría secuestrar y emitir cantidades distintas de carbono. En general La Malinche se está comportando como un sumidero de carbono al secuestrarlo en las áreas con bosque alterado y plantaciones, sin embargo debe de considerarse el balance de carbono que Rojas-García y Villers-Ruíz (2008) publican para determinar acciones.

#### **V.5.6. Discusión final de los resultados de la tesis.**

Se obtuvieron muchos resultados de este trabajo, por lo que solo se presentaran los más importantes.

Respecto a la Evaluación de la deforestación en la zona en estudio y con base en la imagen tomada en 1986 por el Satélite Landsat y la Ortofoto de fecha 2002, se estimó mediante técnicas cartográficas, que hubo una reducción de la superficie boscosa de 5,934 a 5,650 ha entre los años 1986 y 2002, significando una pérdida de superficie forestal de 284 ha (2.84 km<sup>2</sup>), de las cuales poco más de 191 ha se encuentran en el municipio de Puebla. La reducción anual de bosque fue de 17.75 ha, es decir, la tasa de deforestación porcentual fue de 0.3% anual. Esta tasa es 0.5 y 1.7% menor que el rango de tasas de deforestación registrado en el último inventario forestal nacional; sin embargo es comparable con la promedio existente a nivel mundial (0.2%).

Al analizar los resultados obtenidos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos se encontró que la resiliencia (capacidad de amortiguamiento) de los suelos estudiados en la región es buena. Esto se manifiesta en el hecho de que no hubo un cambio significativo en las propiedades de densidad aparente y porcentaje de carbono orgánico de los suelos deforestados después de 1986 en comparación con los suelos con vegetación forestal. Sin embargo cuando se sobrepasa la capacidad de carga del sistema, no es posible seguir amortiguando los cambios y empiezan a ocurrir modificaciones de las

propiedades del suelo. Esto es lo que sucedió en los que fueron deforestados antes de 1986. Estadísticamente, los suelos deforestados entre 1986 y 2002 y los suelos con vegetación forestal, no son significativamente diferentes.

El humus contenido en el suelo es aparentemente estable y parece no haber sufrido una mineralización y por consiguiente no hay una pérdida importante de Carbono Orgánico fácilmente oxidable con el proceso de deforestación. Sin embargo se pudo comprobar que el cambio en el uso del suelo en la región ocurrido antes de 1986 ha ocasionado una emisión significativa de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, entendiéndose que se sobrepasó la capacidad de carga y los suelos sufrieron degradación biológica. Los contenidos de carbono orgánico encontrados para los suelos con vegetación forestal y los deforestados entre 1986 y 2002, varió entre 59.53 ton ha<sup>-1</sup> y 66.11 ton ha<sup>-1</sup>, sin embargo en los deforestados antes de 1986 fue de 39.06 ton ha<sup>-1</sup>, lo que significa que por concepto de degradación biológica, la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en los suelos deforestados antes de 1986 fue de 23.76 ton ha<sup>-1</sup>. Si se considera que estos suelos abarcan 11,390 ha en la zona de estudio, las emisiones se calculan en 270,661 toneladas de CO<sub>2</sub> (ó 270 Gg). Finalmente, las emisiones de CO<sub>2</sub> en los suelos deforestados antes de 1986 son comparables con el 0.3% del total de CO<sub>2</sub> emitido en el rubro "Uso de suelo, Cambio de uso de suelo y Silvicultura" reportado en la Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático con datos del año 2002 (Comunicado de prensa Núm. 193/06 México, D. F., noviembre de 2006).

Para cumplir con los objetivos del trabajo sobre la propuesta de considerar algunas propiedades de los ácidos húmicos de los suelos como indicadoras de la Calidad del Carbono secuestrado. Los resultados obtenidos son claros al demostrar que si hay cambios significativos en los ácidos húmicos de los suelos que soportan vegetación forestal, cuando es modificado el uso de forestal a agrícola y más aun, que los contenidos totales de carbono orgánico de los suelos no son suficientes para caracterizar los procesos que están ocurriendo.

En los suelos de la zona que conservan su vegetación forestal, debido a la cubierta de litter y a la alta humedad que se mantiene bajo las hojas, el ambiente que se forma no permite la presencia de muchas bacterias que podrían mineralizar la materia orgánica, dominando la presencia de hongos, ya que persiste una condición reductora de acuerdo con el valor del potencial redox. La calidad de carbono secuestrado es de tipo P con máximos contenidos totales. Cuando se deforesta, cambia el potencial redox a oxidante, cambian también las poblaciones de microorganismos del suelo. Al aumentar la



actividad biológica aumenta la concentración de ácidos húmicos tipo A y B, disminuye la reserva de carbón aunque su disminución estadísticamente no es significativa. Pero una vez que se ha consumido por parte de los microorganismos el sustrato orgánico de origen forestal original, se retorna a una condición de ácidos húmicos tipo P.

En la zona deforestada entre 1986 y 2002 (8MAL), sin embargo, existen ácidos húmicos con un mayor peso molecular y condensación aromática, así como una alta Melanización. Al momento de deforestar, las bacterias comienzan a mineralizar la materia orgánica, por lo que se cuenta con un suelo fértil, pero como lo ha demostrado reiteradamente la experiencia de los agricultores, con el tiempo esto se termina y el suelo se transforma en muy poco fértil, en términos técnicos significa que se venció la capacidad de carga del suelo para actuar como un amortiguador en contra de su degradación. Con el uso de los indicadores de Calidad de Carbono Secuestrado en los suelos, se determinó que su capacidad de carga se vence en un periodo de 16 años.

## **CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **VI.1. Conclusiones generales:**

- En la zona de suelos volcánicos de la Región Terrestre Prioritaria para la Conservación “RTP-106 La Malinche” correspondiente al estado de Puebla, entre 1986 y 2002 se ha perdido una superficie forestal de 284 ha (2.84 km<sup>2</sup>).
- Se calculó que las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera ocurridas durante este periodo son de 270,661 toneladas de C (ó 270 Gg).
- Los suelos estudiados presentan una alta resiliencia, es decir tienen la capacidad de carga para amortiguar la degradación biológica generada por el cambio de uso venció en un periodo de 16 años.
- Se demostró cambios significativos en los ácidos húmicos de los suelos que soportan vegetación forestal, cuando es modificado el uso de forestal a agrícola.
- Fue posible establecer que el grado de humificación, el índice melánico y el umbral de coagulación de los ácidos húmicos, pueden ser considerados como propiedades indicadoras de calidad de carbono secuestrado en suelos.

### Conclusiones sobre la evaluación de la deforestación en la zona de estudio:

- La superficie forestal en la zona de estudio se redujo de 5,934 a 5,650 hectáreas entre los años 1986 y 2002. Hubo una pérdida de superficie forestal de 284 ha, de las cuales, poco más de 191 ha se encuentran en el municipio de Puebla.
- La reducción anual de bosque fue de 12.90 hectáreas.
- La tasa de deforestación anual porcentual en la región estudiada, en el periodo 1986-2002 fue de 0.3%; siendo entre 0.5 y 1.7% menor que el rango de tasas de deforestación registrado en el último inventario forestal nacional.
- La tasa de deforestación porcentual en la región estudiada, ocurrida entre los años 1986 y 2002, es comparable con la tasa promedio existente a nivel mundial.

### Conclusiones sobre el análisis climático

- La degradación biológica del suelo en áreas deforestadas de región de La Malinche ha provocado un cambio en los patrones de precipitación y un aumento

en la temperatura promedio anual durante el periodo de 1995 a 2005 en comparación con el de 1985 a 1995.

- En la región hubo un aumento de la temperatura promedio de 0.8 °C y aunque la precipitación promedio permaneció constante (790 mm de agua), sí hubo un cambio en la cantidad de agua que precipita en algunas localidades de la región.
- Las localidades más afectadas por el cambio en el microclima son: San Miguel Canoa y Puebla capital.

#### **Conclusiones sobre el balance hídrico y el régimen de humedad:**

- El régimen de humedad del suelo en la región es Ústico, tanto para el periodo de 1985-1995 y el periodo de 1995-2005.

#### **Conclusiones de las propiedades físicas y químicas de los suelos:**

- Hay resiliencia de los suelos estudiados en la región de La Malinche. Esto se manifiesta en el hecho de que no hubo un cambio significativo en las propiedades de densidad aparente, porcentaje de materia orgánica y porcentaje de carbono orgánico de los suelos deforestados después de 1986 en comparación con los suelos con vegetación forestal.
- Las propiedades de porcentaje de humedad, delta pH y relación C/N no manifestaron cambios significativos en ninguno de los tres tipos de suelos estudiados.
- Para las propiedades de acidez hidrolítica, acidez intercambiable y porcentaje de humedad no se pudo definir cuál es el comportamiento exacto de los suelos, probablemente se necesite un mayor número de muestras para poder obtener una conclusión válida.

#### **Conclusiones finales del trabajo respecto a la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por degradación biológica del suelo:**

- Se pudo comprobar que el cambio en el uso del suelo en la región del volcán La Malinche ocurrido antes de 1986 ha ocasionado una emisión significativa de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Se encontró que, por el contrario, el cambio en el uso del suelo en la región del volcán La Malinche ocurrido en el periodo 1986-2002 **no** ha ocasionado una emisión significativa de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

- Estadísticamente, los suelos deforestados entre 1986 y 2002 y los suelos con vegetación forestal, no son significativamente diferentes. El humus contenido en el suelo es tan estable que no ha sufrido una mineralización y por consiguiente no hay una pérdida importante de carbono orgánico fácilmente oxidable con el proceso de deforestación.
- En los suelos deforestados antes de 1986, se sobrepasó su capacidad de carga y sufrieron degradación biológica.
- La emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en los suelos deforestados antes de 1986 fue de 23.76 ton ha<sup>-1</sup>. Si se considera que estos suelos abarcan 11,390 hectáreas en la zona de estudio, las emisiones se calculan en 270,661 toneladas de CO<sub>2</sub> (ó 270 Gg).
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> en los suelos deforestados antes de 1986 son comparables con el 0.3% del total de CO<sub>2</sub> emitido en el rubro “Uso de suelo, Cambio de uso de suelo y Silvicultura” reportado en la Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático con datos del año 2002.

## **SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES**

En función de las conclusiones obtenidas en este trabajo, se hacen las siguientes recomendaciones:

- De no aplicarse un programa adecuado de manejo, los suelos terminarán por degradarse, como los de las áreas deforestadas antes de 1986, donde la pérdida del carbono orgánico de los suelos es ya un hecho.
- Se sugiere la reforestación de las zonas en donde se ha cambiado el uso del suelo en la región de La Malinche. Será necesario investigar otras estrategias que posiblemente implicarán una sucesión de diferentes plantas, hasta llegar a la recuperación del medio original, si es que eso es posible.
- Se sugiere realizar estudios microbiológicos de las zonas estudiadas para analizar las poblaciones bacterianas en los suelos y así profundizar el estudio.

## REFERENCIAS

1. AGUILAR, A., Etchevers J.D. & Castellanos J. Z. (1987). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo*. Volumen 1. 217 p. México.
2. ALCÁNTAR, G., Etchevers, J. D. & Aguilar, A. (1992). Los análisis físicos y químicos. Su aplicación en agronomía. México: Cámara Nacional de la Industria Editorial.
3. ALMENDROS, G. (2000). Procesos de la transformación de la Materia Orgánica en ecosistemas agrícolas e inalterados. *La Edafología y sus perspectivas en el siglo XXI*. Tomo I. Madrid.
4. ALMENDROS, G. & Ganuza, A., (2001), "Organic carbon storage in soils of the Basque Country (Spain): the effect of climate, vegetation type and edaphic variables. *Biology and Fertility of Soils*, 37: 154-162.
5. ANDREUX, F. (2005). *La materia orgánica del suelo desde la perspectiva pedogenética*. En: Memorias Seminario Materia Orgánica y microorganismos en la Agricultura Colombiana. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 24 p.
6. ARREOLA D. P., Bori G.; Valera M. A., Torres E. & Linares G. (2010). Calidad de Suelo de los sistemas forestales: cambios en el clima y capacidad del suelo para infiltrar agua. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Volumen 26 (1); p. 364.
7. BAIRD, C. (2001). *Química ambiental*. Ed. Reverté. Barcelona. 625p.
8. BENDECK, M. (2003). Origen y formación del humus. Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellín.
9. BOLIN, B. (1986). The green house effect, climatic change, and ecosystems. Gran Bretaña: John Wiley & Sons.
10. BURT, R. (2004). Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report 42, versión 4.0. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
11. CASTAÑEDA, D. (2011). Impacto del cambio climático de las comunidades vegetales del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México. Facultad de Ciencias. UNAM. Dir. Tesis: Dra. María de Lourdes Villers Ruiz; p.123

12. CONAFOR, (2012). COMISIÓN NACIONAL FORESTAL. Recuperado el 10 de Abril de 2012, de SEMARNAT:  
<http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/suelos>
13. CONAP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Última consulta: marzo 2013. Áreas protegidas decretadas. SEMARNAT.  
[http://www.gob.mx/wb/egobierno/egob\\_directorio\\_de\\_areas\\_naturales\\_protegidas1](http://www.gob.mx/wb/egobierno/egob_directorio_de_areas_naturales_protegidas1))
14. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. 2003. LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE (Última reforma aplicada 13/06/2003). Centro de Calidad Ambiental Uninet.  
<http://www.bordercenter.org/pdfs/GeneralEcologicalBalanceandEnvironmentProtectionAct.pdf>.
15. CROWLEY, T. J. & North, G. R. (1988). Abrupt Climate Change and Extinction Events in Earth History. *Science*. 240 (4855): 996-1002,  
[doi:10.1126/science.240.4855.996](https://doi.org/10.1126/science.240.4855.996), [ISSN 1095-9203](https://www.issn.org/issn/1095-9203)
16. CUATECONZI, D. H. & Gasca, J. 2004. Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, p. 87-98. En: Martínez, J., y Fernández, A. (Comp.). *Cambio climático: una visión desde México*. INE-SEMARNAT. ISBN 968-817-704-0.
17. DE PETRE, A. O. (2005). Captura de Carbono. Recuperado el 11 de 04 de 2012, de <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/PBVyAP/File/A3/PIARFON%20MyE/Captura%20de%20carbono.pdf>
18. Dirección de Agrología (1972). Instructivo para la determinación del clima de acuerdo al Segundo Sistema de Thornthwaite. Secretaría de Recursos Hidráulicos, México.
19. Dirección General de Políticas para el Cambio Climático - SEMARNAT. (2010). Cambio Climático. Recuperado el 02 de abril de 2012, de <http://www.cambioclimatico.gob.mx/index.php/fundamentos.html>
20. DIXON, R., Brown, S., Houghton, R., Solomon, A., Trexler, M. & Winiewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263, 185-90.
21. DORRONSORO, C. (2012). Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada. España. Recuperado el 28 de 05 de 2012, de Introducción a la Edafología: <http://edafologia.ugr.es/index.htm>
22. DUCHAUFOR, P. (1972). *Agronomía Tropical* Vol. 22 (5). Sección de Suelos, Maracay, Venezuela. Recuperado el 28 de 05 de 2012, de Pruebas de metodología para la extracción de sustancias húmicas en los suelos:

- [http://sian.inia.gov.ve/respositorio/revistas\\_ci/Agronomia%20Tropical/at2205/arti/brito\\_j.htm](http://sian.inia.gov.ve/respositorio/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at2205/arti/brito_j.htm)
23. EDUCARCHILE, (2011). Curso: La tierra fuerzas de la naturaleza y el hombre. Universidad de Chile, Departamento de Pregrado. <http://www.educarchile.cl/autoaprendizaje/tierra/modulo2/clase3/texto/volcanis.htm>
  24. ESRI (2000). ArcView 3.2a, Environmental systems Research Institute Inc., Redlands CA, 2000.
  25. FAVORETTO, C. M. (2007). Caracterização da matéria orgânica humificada de um Latossolo Vermelho Distrófico a través da espectroscopia de fluorescencia inducida por laser. Dissertação (Mestrado na área de Química Aplicada). Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 99 p.
  26. FAO, (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO, PNUMA. Roma.
  27. FAO. (2002). Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, Italia.: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
  28. FAO. (2011). Situación de los bosques del mundo 2011. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. ISBN 978-92-5-306750-3. (<http://www.fao.org/docrep/013/i2000s/i2000s00.htm>).
  29. FRIMMEL, F.H. & Christman, R.F. (1988). Humic Substances and their role in the Environment. Dahlem Workshop Report LS 41. Chichester: Wiley.
  30. GALLARDO, J. (2007). El ciclo del Carbono y la dinámica en los sistemas forestales. En El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático (págs. 43-64 ). Salamanca, España.: Fundación Gas Natural.
  31. GARCÍA-CALDERÓN N. E. (2001). Comportamiento de las sustancias húmicas en la Naturaleza. En: *Los retos de la Edafología en el entorno de las megalópolis*, Memorias del XX Curso- Diplomado Internacional de Edafología. Nicolás Aguilera. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México., pp. 471-473. ISBN 970-32-0249-7.
  32. GARDUÑO, R. (2004). ¿Qué es el efecto invernadero? En A. F. Compiladores: Julia Martínez, Cambio Climático: Una visión desde México (pág. 31). México: INE.
  33. GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA. (2002). Programa Integral de Manejo del Parque Nacional La Malinche. SEMARNAT; SEDURBECOP; CGE; SDR. México.

<http://www.semarnat.gob.mx/tlaxcala/programas/malinche/index.htm>.

Última Consulta: Mayo 2006.

34. GOIJBERG, G. & Aguilar, A. (1987). pH del suelo y necesidades de cal, pp. 17-44. En: *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. Aguilar, A.; Etchevers, J.D. y Castellanos, J.Z. Sociedad mexicana de la ciencia del suelo. Publicación especial No. 1.
35. GÓMEZ ÁLVAREZ, G., et al. (1993). Fauna silvestre del Parque Nacional La Malintzi, Tlaxcala. en Memoria de resúmenes del primer congreso sobre parques nacionales y áreas naturales protegidas de México: pasado, presente y futuro. Tlaxcala. Pp. 40-42
36. HAMBURG, S. (2000). Simple rules for measuring changes in ecosystem carbon in forestry-offset projects. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 5(1):25-37
37. HÄTTENSCHWILER, S. & Körner, C. (1996). System-level adjustments to elevated CO<sub>2</sub> in model spruce ecosystems. *Global Change Biology*, 2, 377–387
38. <http://www.ciclodelcarbono.com/>. (s.f.). Ciclo del carbono. Recuperado el 11 de 04 de 2012, de <http://www.ciclodelcarbono.com/> Última Consulta: 30 de julio de 2014.
39. IGBP-TC-WG. (1998). The Terrestrial Carbon Cycle: implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 280, 1393–1394.
40. INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). (2005). Enciclopedia de los Municipios de México. Secretaria de Gobernación. En [http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC\\_Enciclopedia](http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia) Última Consulta: Diciembre 2006.
41. INE-SEMARNAT. (12 de Agosto de 2010). La ciencia del cambio climático. Recuperado el 04 de Abril de 2012, de Instituto Nacional de Ecología: <http://www.ine.gob.mx/cpcc-ciencia>
42. INEGI (1986). Síntesis geográfica de Tlaxcala. Secretaría de programación y presupuesto. México.
43. INEGI. (1995). Carta Topográfica escala 1:50 000. Heroica Puebla de Zaragoza E14B43. Segunda edición.
44. INEGI. (1998). Carta Topográfica escala 1:50 000. Tepatlaxco E14B44. Segunda edición.
45. INEGI. (2000). Síntesis geográfica del estado de Puebla. Libro electrónico. México.
46. INEGI. 2005. Anuario Estadístico de Puebla. México.



47. IPCC . (1995). *Climate Change*. Cambridge, Inglaterra.: Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press.
48. IPCC. (2001). Tercer informe de Evaluación del IPCC: "Cambio Climático 2001: La base científica".
49. IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. Ginebra, Suiza.
50. JANDL, R. (2001). Medición de tendencias en el tiempo del almacenamiento de carbono del suelo. Valdivia, Chile.
51. JARAMILLO, D. F. (2011). Caracterización de la Materia Orgánica del horizonte superficial de un Andisol Hidromórfico del Oriente Antioqueño. Colombia: Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
52. JARAMILLO, V. (2004). El ciclo global del carbono. En J. & Martínez, *Cambio climático: una visión desde México* (pp. 496). México: SEMARNAT-INE.
53. KONONOVA, M.M. & Belchikova, N.P. (1960). *Quick methods of determining the humus composition of mineral soils*. Sov. Soil Sci. (10), 1112 – 1120 p.
54. KUMADA, K. (1987). *Chemistry of soil organic matter*. Japan Scientific Societies Press. Elsevier. Tokyo. , 241 p.
55. KUEHL, R.O. (2001). Diseño de experimentos. Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones. 666 p.
56. LLAGUNO, J., Torres, E. & Valera, M. (2005) el clima y el futuro del recurso agua en la microregión de la Malinche. Pp.9  
[http://www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/memorias/Extenso/CB/EC/CBC-21.pdf](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/CB/EC/CBC-21.pdf)  
Última Consulta: 27 de marzo de 2013
57. LAL, R. & Sánchez, P. (1992). Myths and science of soils of the tropics. SSSA Special Pub. 29; Soil Sci. Soc. Am., Madision, WI, USA.
58. LLAGUNO, J. (2007) Emisiones del gas de efecto invernadero 'dióxido de carbono' en los suelos forestales del Volcán La Malinche, Estado De Puebla. Tesis de Licenciatura. Colegio de Ingeniería Química. BUAP.
59. LOA L., Cervantes A., Durand S. & Peña J. (1996) "Uso de la biodiversidad". En: Conabio. La biodiversidad biológica de México. Estudio de país. Conabio, México. pp. 104-153

60. LOVELOCK, J. 1. (2004). El ciclo global del carbono. En M. & Fernández, *Cambio Climático: Una visión desde México* (p. 496). México: SEMARNAT-INE.
61. MAGAÑA, V. (2004). El cambio climático global. ¿Qué es el efecto invernadero? En J. Martínez, A. Fernández Bremauntz, & P. Osnaya, *Cambio Climático: Una visión desde México* (Pp. 17-28). México: INE-SEMARNAT.
62. MARTÍNEZ, J., Fernández, A., & Osnaya, P. (2004). Cambio Climático: Una visión desde México. (Compilación). México D. F. :Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 525 p.
63. MARÍN, M., Silva, V., Linares, G., Ticante, J. & López, M. (2007). Patrones Espaciales de Hongos Ectomicorrízicos del Parque Nacional Malintzi en Puebla y la Preservación de su Micelio. En:  
[http://www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/memorias/Extenso/CB/EC/CBC-34.pdf](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/CB/EC/CBC-34.pdf)  
Última Consulta: 24 de julio de 2014
64. MASERA, O.R., M.J. Ordoñez & R. Dirzo. (1997). Carbon emissions from Mexican Forests: Current Situation and Long-term Scenarios, *Climatic Change* 35: 265-295.
65. MILLAR, C.E., L.M. Turk & H.D. Foth. (1980). *Fundamentos de la Ciencia del Suelo*. México, D.F: Editorial Continental.
66. NOAA. (2013). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Recuperado el 20 de 11 de 2013, <http://www.noaa.gov/>
67. NOAA. (2012). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Última Consulta: 10 de 04 de 2012, de Climate Services:  
<http://www.climate.gov/#understandingClimate>
68. NRCS (Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture and Soil Quality Institute). (1999). A guide to develop locally adapted conservation tolos.
69. OMM. (2011). Organización Meteorológica Mundial. Última Consulta: 06 de 04 de 2012, de Comunicado de prensa N° 934:  
[http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press\\_releases/pr\\_934\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_934_es.html)
70. ORDÓÑEZ, J., & Masera, O. (2001). Captura de Carbono ante el cambio climático. *Madera y Bósques*. Instituto de Ecología, A.C. Vol. 7 , número 001 , 3-12.
71. ORESKES, 2004. Beyond the Ivory Tower. The Scientific Consensus on Climate Change. *Science* 306 (5702): 1686, [doi:10.1126/science.1103618](https://doi.org/10.1126/science.1103618), [ISSN 1095-9203](https://doi.org/10.1126/science.1103618)

72. PEÑA, W., Leiros de la Peña, M. & Briceño, J. (2005). Propiedades generales y bioquímicas de suelos forestales en áreas serpentizadas de Galicia. *Agronomía Costarricense*, 29(3): 71-78.
73. PNUMA, (2010). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Última Consulta: 10 de 04 de 2012, de ¿5 gigatoneladas-la brecha entre lo indicado por la ciencia climática y las reducciones actuales luego de Copenhague?: [http://www.pnuma.org/informacion/comunicados/2010/23Noviembre2010/1cpb35n\\_i.htm](http://www.pnuma.org/informacion/comunicados/2010/23Noviembre2010/1cpb35n_i.htm)
74. PORTA, J., López-Acevedo, M. & Roquero, C. (2003). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Ediciones Mundi-prensa. 929 p.
75. PRITCHETT, W. (1986). Suelos Forestales, Propiedades, Conservación y Mejoramiento. Edit. Limusa/Noriega. México.
76. PRITCHETT, W. & Fisher, R. (1987). *Properties and management of forest soils*. Segunda Edición. 494 p.
77. RUIZ, L. G. & Cruz, X. (2004). Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México. En *Cambio Climático: Una visión desde México*. (pág. 112). México: INE.
78. RUIZ, M. E. (15 de 05 de 1997). Caracterización de las sustancias húmicas presentes en microagregados de suelos de dos toposecuencias. *Agronomía Tropical*. , 47(4): 381-395.
79. RUIZ-SOBERANES, J. y Gómez-Álvarez, G. (2010). Estudio mastofaunístico del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México. *THERYA*, Agosto, 2010. Vol.1(2): 97-110
80. SCHINTZER, M. K. (1972). *Humic Substances In The Environment*. N.Y.: Marcel Dekker, Inc.
81. SEMARNAT. (2001). Inventario Forestal Nacional 2000-2001. México. En: <http://132.248.14.16/inventario.html> y <http://www.ejournal.unam.mx/ciencias/no64/CNS06403.pdf> Última Consulta: Mayo 2007
82. SEMARNAT. (2002). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>.  
Última consulta: 30 de julio de 2014.

83. SEMARNAT-INE. (08 de Junio de 2010). Cambio climático en México. Última Consulta: 03 de Abril de 2012, de Para comprender el cambio climático: [http://cambio\\_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/queeselcc/queeselcc.html](http://cambio_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/queeselcc/queeselcc.html)
84. SEMARNAT-INE. (2006). Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México: Comité Intersecretarial de Cambio Climático SEMARNAT-INE.
85. SEMARNAT-PNUMA (2006) El Cambio Climático en América Latina y el Caribe. 138 Pp.
86. SENESI, N. y Miano, T. (1994). Humic substances in the global environment and implications on human health. *Elsevier*, Amsterdam. Pp. 1189-1194.
87. SOIL QUALITY INSTITUTE STAFF. (1999). Soil Quality Test Kit Guide. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute. 82 Pp.
88. SOIL SURVEY STAFF, (1999). Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 2nd edition. Agricultural Handbook 436, Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington DC, USA, pp. 869 (Pp. 57–60)
89. SPOSITO, G. (2005). The Surface Chemistry of Natural Particles. Oxford University Press Inc.
90. SPOSITO, G. (2008). The Chemistry of Soils, 2nd edition. Oxford University Press Inc.
91. STEVENSON, (1982). Humus Chemistry, Genesis, composition, Reaction. John Wiley and Sons, New York. 443 p.
92. STEVENSON, F. (1994). Humus Chemistry. 2nd Ed. Wiley, New York.
93. STEVENSON, F. (1982). Humus Chemistry. Genesis. Composition. Reactions. N.Y.: Wiley Interscience.
94. STEVENSON, F. & Butler, J. (1969). Chemistry of humic acids and related pigments. Organic geochemistry. Springer Verlag, New York: Eglinton, G., and M. T .J. Murphy, editors. pp. 534-557.
95. THENG, B., Tate, K., & Sollins, P. (1989). Constituents of organic matter in temperate and tropical soil.
96. UEHARA, G. & G. Guilman. 1981. The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press, Boulder, Colorado.
97. VALERA, M., García, N., Torres, E., y García. (2005). Calidad de los Compuestos de Carbono formados en los suelos de los sistemas forestales, el caso del Bosque

- Mesófilo de Montaña o Bosque de Niebla. Memoria del foro “Desarrollo rural y cambio. México: Secretaría de Relaciones Exteriores, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional Forestal y Agenda Ciudadana Fundación para el Desarrollo, A.C.
98. VELA, G. (2007). Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de *Pinus Montezumae* Lamb en el Volcán La Malinche, México. *Agrociencia*, mayo-junio, año/vol. 41, número 004 Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. Pp. 371-383
  99. VELA, G. (2009). Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación. México, D.F.
  100. VELÁZQUEZ, A., Mas, J. F., Díaz, J. R., Mayorga, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurraa, E., & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. INE-SEMARNAT. México, DF. *Gaceta Ecológica*, 62:21-37. I., 62(2):284-296. (<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/539/53906202.pdf>)
  101. VILLERS, L. & I. Trejo. (1998). Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia*. Revista de Ciencia y Tecnología. Caracas, Venezuela. Vol. 23 (1): 10-19.
  102. WALKLEY, A. & Black, T. A. (1934). *An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and the proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Sci. 37: 29-38.
  103. WERNER, G., Mielich, G. & Aepli, H. (1976) Mapa de suelos de la Cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores. Instituto de Edafología y Conservación de suelos de la Universidad Justus Liebig de Giessen. República Federal de Alemania.
  104. WONG, J. & Villers, M. (2006) Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. UNAM. *Investigaciones Geográficas*, Boletín 62, 2007. ISSN 0188-4611, Núm. 62, 2007, pp. 87-103
  105. ZAGAL, E., Rodríguez, N., & Vidal, I. &. (2002). La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios de la materia orgánica lábil. Agricultura Técnica. Magaña, V. (2004). El cambio climático global. ¿Qué es el efecto invernadero? En J. Martínez, A. Fernández Bremauntz, & P. Osnaya, *Cambio Climático: Una visión desde México* (págs. 17-28). México: INE-SEMARNAT.