

**PARTE DE ESTE TRABAJO SE HA PRESENTADO EN LOS SIGUIENTES
EVENTOS CIENTÍFICOS**

Castillo M. M., Linares F. G. y Valera P. M. A. (2014). ESTUDIO COMPARATIVO DE LA DETERMINACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELO EN LA REGIÓN DE TEZIUTLÁN, PUEBLA, MÉXICO. XII Congreso Internacional XVIII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, Acapulco, Guerrero, México.

Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, Maribel Castillo Morales. (2013). LA GEOESTADÍSTICA COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS ESPACIAL DE DATOS DE CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS. Sexta Semana Internacional de la Estadística y las Probabilidades (6SIEP). Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. BUAP. Puebla México.

Gladys Linares Fleites, Edgardo Torres Trejo, Maribel Castillo Morales y Miguel Ángel Valera Pérez. (2013). MODELACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA DISTRIBUCIÓN DEL CARBONO EN SUELOS EN TEZIUTLÁN PUEBLA, MÉXICO. XXVIII Foro Nacional de Estadística. Aguascalientes, México.

Linares F. Gladys; Valera P. Miguel A.; Castillo M. Maribel. (2013) MODELACIÓN ESPACIAL DE LOS CONTENIDOS DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS VOLCÁNICOS DE TEZIUTLÁN, PUEBLA, MÉXICO. XII Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Gladys Linares Fleites, Rafael L. Rodríguez Cunill, Miguel A. Valera Pérez, Maribel Castillo Morales. (2013). ENFOQUE DE INVENTARIO REPETIDO EN LA DETERMINACION DE CAMBIOS DEL CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO. IX Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Linares F. Gladys; Valera P. Miguel A.; Castillo M. Maribel. (2012). CAMBIOS DEL CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO ENTRE 1987 - 2009 EN UNA ZONA DE TEZIUTLÁN, PUEBLA, MÉXICO. XI Congreso Internacional XVII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Mazatlán, Sinaloa, México

Maribel Castillo Morales, Gladys Linares Fleites, Miguel Ángel Valera Pérez, Norma E. García Calderón, Otilio A. Acevedo Sandoval y Raimundo Jiménez Ballesta. (2011). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS CONTENIDOS DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS VOLCÁNICOS. VI Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental (SiFyQA). Cancún, México

Gladys Linares Fleites, Maribel Castillo Morales, Miguel A. Valera Pérez. (2011). ESTIMACIÓN BAYESIANA DE LA DENSIDAD DE CARBONO EN SUELOS FORESTALES USANDO UN MODELO DE MEZCLAS DE NORMALES DE DIRICHLET. Octavo Bayesian Non Parametric Workshop. Veracruz, México

Maribel Castillo Morales, Gladys Linares Fleites, Miguel A Valera Pérez. (2011). CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS VOLCÁNICOS DE LA REGIÓN DE

TEZIUTLÁN, PUEBLA. X Congreso Internacional XVI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Querétaro, México

Linares F., G.; Castillo M., M. y Valera P., M. A. (2011). ESTIMACIÓN BAYESIANA DE LA DENSIDAD DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS SEGÚN REGÍMENES DE HUMEDAD Y TEMPERATURA. X Congreso Internacional XVI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Querétaro, México

Gladys Linares Fleites, Maribel Castillo Morales, Miguel A. Valera Pérez, Ana M. Rodríguez Linares. (2011). REGRESIÓN ENTRE VARIABLES CLIMÁTICAS Y CONTENIDO DE CARBONO EN SUELOS VOLCÁNICOS DE LA REGIÓN DE TEZIUTLÁN, PUEBLA, MÉXICO. II Congreso Internacional sobre Cambio Climático. La Habana, Cuba

Gladys Linares Fleites, Maribel Castillo Morales, Miguel A. Valera Pérez. (2011). ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD MARGINAL BAJO EL ENFOQUE BAYESIANO NO PARAMÉTRICO APLICADO AL CAMBIO CLIMÁTICO. Cuarta Semana Internacional de la Estadística y la Probabilidad. Puebla, Pue., México

Linares F., G.; Castillo M., M. y Valera P., M. A. (2011). ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD BIVARIADA BAJO EL ENFOQUE BAYESIANO NO PARAMÉTRICO. XXV Foro Nacional de Estadística, Cuernavaca, Morelos, México

Castillo Morales M., Linares Fleites G., Valera Pérez M. A., Torres Trejo E., García Calderón N. E., Acevedo Sandoval O. A., Jiménez Ballesta R. (2010). ESTIMACIÓN DE LOS REGÍMENES DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DE SUELOS VOLCÁNICOS DE LA REGIÓN DE TEZIUTLÁN, PUEBLA, MÉXICO Y SU RELACIÓN CON LOS CONTENIDOS DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO. IX Congreso Internacional XV Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Chetumal, Quintana Roo, México

M. Castillo Morales, G. Linares Fleites, M. A. Valera Pérez, N. E. García Calderón, O. A. Acevedo Sandoval, R. Jiménez Ballesta. (2009). ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO ORGÁNICO EN DIVERSOS SUELOS BAJO DIFERENTES TIPOS DE BOSQUES. VII Congreso Ibérico X Congreso Nacional de Geoquímica. Soria, España

Maribel Castillo Morales, Gladys Linares Fleites, Miguel Á. Valera Pérez, Norma E. García Calderón, Otolio A. Acevedo Sandoval y Raimundo Jiménez Ballesta. (2010). SECUESTRO DE CARBONO EN SUELOS FORESTALES DE LA CALDERA DE TEZIUTLÁN, PUEBLA. Primer Encuentro Internacional de Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. BUAP Puebla, Pue. México.

Maribel Castillo Morales, Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, Norma E. García Calderón, Otilio A. Acevedo Sandoval y Raimundo Jiménez Ballesta. (2009). ALMACENES DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE BOSQUES TEMPLADOS: ALGUNAS COMPARACIONES. VIII Congreso Internacional XIV Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Tlaxcala, México

Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, Maribel Castillo Morales. (2009). ESTRATEGIA DE MUESTREO REPETIDO PARA ESTIMAR CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA. VIII Congreso Internacional XIV Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Tlaxcala, México

Gladys Linares Fleites, Miguel Ángel Valera Pérez y Maribel Castillo Morales. (2009). OPCIÓN DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO: SECUESTRO DE CARBONO EN SUELOS DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA, MÉXICO. VII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, I Congreso de Cambio Climático. Ciudad de la Habana. Cuba

Maribel Castillo Morales, Norma E. García Calderón, Otilio A. Acevedo Sandoval, Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez. (2008). MODELACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS VOLCÁNICOS Y SU RELACIÓN CON EL SECUESTRO DE CARBONO EN LA REGIÓN DE TEZIUTLÁN, PUEBLA. VII Congreso Internacional XIII Congreso Nacional III Congreso Regional de Ciencias Ambientales. Cd. Obregón, Sonora, México

Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, Maribel Castillo Morales, María de Lourdes Sandoval Solís. (2008). RELACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBÓNICO ORGÁNICO Y EL NITRÓGENO EN SUELOS FORESTALES DE TEZIUTLÁN, PUEBLA. VII Congreso Internacional XIII Congreso Nacional III Congreso Regional de Ciencias Ambientales. Cd. Obregón, Sonora, México

Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, Maribel Castillo Morales, María de Lourdes Sandoval Solís. (2007). CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS DE ORIGEN VOLCÁNICO. VI Congreso Internacional y XII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Chihuahua, México

Linares Fleites, Gladys; Valera Pérez, Miguel Ángel, Castillo Morales, Maribel, Tenorio Arvide, María Guadalupe. (2007). DISCRIMINACIÓN LINEAL Y DISCRIMINACIÓN LOGÍSTICA EN ESTUDIOS DE CALIDAD DE SUELOS. XXII Foro Nacional de Estadística y XI Seminario de Estadística Aplicada del Inter American Statistical Institute. Querétaro, México

Maribel Castillo Morales, Miguel Ángel Valera Pérez, Gladys Linares Fleites. (2007). EFECTOS DEL CAMBIO DE USO EN SUELOS VOLCÁNICOS DE LA CALDERA DE TEZIUTLÁN, ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO. Volcánicos VI Congreso Internacional y XII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Chihuahua, México

Miguel Ángel VALERA PÉREZ, Gladys LINARES FLEITES, Maribel CASTILLO MORALES y Josefina CERVANTES VARGAS. (2006). EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN POTENCIAL DE ANDISOLES POR EL CAMBIO DE USO DE SUELO. V Congreso Internacional y XI Nacional de Ciencias Ambientales, Morelos, México

Gladys Linares Fleites, Miguel Ángel Valera Pérez, Guadalupe Tenorio y Maribel Castillo. (2006). REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA LA INTERPRETACIÓN DE CONFIGURACIONES DE SUELOS EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA. XX Foro Nacional de Estadística. Guanajuato, Guanajuato, México

Publicaciones desarrolladas durante el doctorado

Linares, G. Valera, M.A., Castillo, M. (2014). *Modelación espacial de los Contenidos de Carbono Orgánico en Suelos Volcánicos de Teziutlán, Puebla, México*. Aceptado en la Revista Ciencias de la Frontera.

Castillo Morales, Maribel; Linares Fleites, Gladys; Valera Pérez, M. A.; García Calderón, N. E.; Acevedo Sandoval, O. A.; Jiménez Ballesta, R. (2011). *Regresión polinomial en la estimación de carbono orgánico según los regímenes de humedad y temperatura de Suelos volcánicos de Teziutlán, Puebla, México*. Revista de Ciencias Matemáticas. Ed. Universidad de la Habana. Dirección de Información Científica y Técnica, Cuba. Vol. 25 pp. 66-75. ISBN 0256-5374

Linares F., G.; Castillo M., M. y Valera P., M. A. (2011). *Estimación Bayesiana de la Densidad del Carbono Orgánico en suelos según regímenes de Humedad y Temperatura*. Memoria del X Congreso Internacional XVI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Querétaro, México. ISBN 978-607-7740-93-3

Gladys Linares Fleites y Maribel Castillo Morales. (2011). *Estimación de la Densidad Marginal bajo el enfoque Bayesiano no paramétrico aplicado al cambio climático*. Memorias de la Cuarta Semana Internacional de Estadística y Probabilidad, Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas, BUAP, México. ISBN 978-607-4873-245

Castillo Morales M., Linares Fleites G., Valera Pérez M. A., Torres Trejo E., García Calderón N. E., Acevedo Sandoval O. A., Jiménez Ballesta R. (2010). *Estimación de los Regímenes de humedad y temperatura de suelos volcánicos de la Región de Teziutlán, Puebla, México y su relación con los contenidos de carbono orgánico del suelo*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Ed. UNAM. Vol. 26. Año 2010 pp. 140. ISSN: 0188-4999

Gladys Linares Fleites, Maribel Castillo Morales, Miguel A. Valera Pérez. (2010). *Modelo mixto en la estimación de carbono orgánico en suelos según regímenes de humedad y temperatura*. Estadística en el Medio Ambiente y sus usos. Ed. Fomento Editorial de la BUAP. Capítulo de Libro. pp. 114-118. ISBN 978-607-487-231-6

Maribel Castillo Morales, Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, Norma E. García Calderón, Otilio A. Acevedo Sandoval y Raimundo Jiménez Ballesta. (2010). *Secuestro de carbono en suelos forestales de la Caldera de Teziutlán, Puebla*. Estadística en el Medio Ambiente y sus usos. Ed. Fomento Editorial de la BUAP. Capítulo de Libro. pp. 114-118. ISBN 978-607-487-231-6

Maribel Castillo Morales, Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, Norma E. García Calderón, Otilio A. Acevedo Sandoval y Raimundo Jiménez Ballesta. (2009). *Almacenes de carbono orgánico en suelos de bosques templados: algunas comparaciones*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol. 25 Suplemento 1 ISSN: 0188 4999

Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, Maribel Castillo Morales. (2009). *Estrategia de Muestreo Repetido para estimar carbono orgánico del suelo en la Sierra Norte de Puebla*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol. 25 Suplemento 1 ISSN: 0188 4999

Gladys Linares Fleites, Miguel Ángel Valera Pérez y Maribel Castillo Morales. (2009). *Opción de mitigación del cambio climático: secuestro de carbono en suelos de la Sierra Norte de Puebla, México*. VII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, I Congreso de Cambio Climático. Ciudad de la Habana. Cuba. ISBN 978-959-304-003-7

M. Castillo-Morales, G. Linares-Fleites, M. A. Valera Pérez, N. E. García Calderón, O. A. Acevedo Sandoval. (2009). *Modelación de la materia orgánica en suelos volcánicos de la región de Teziutlán, Puebla, México*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. Vol. 5. No. 2. pp. 148-154

Gladys Linares Fleites, Miguel Ángel Valera Pérez y Maribel Castillo Morales. (2008). *Discriminación lineal y discriminación logística en estudios de calidad de suelos*. Memorias del XXII Foro Nacional de Estadística. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. ISBN 978 970 13 5055 3

Gladys Linares Fleites, Miguel Ángel Valera Pérez y Maribel Castillo Morales. (2007). *Análisis de datos de suelos forestales en la caldera de Teziutlán, Puebla, por componentes principales y técnicas geoestadísticas*. En: Memorias del XXI Foro Nacional de Estadística. pp 63-68. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. ISBN 978-970-13-4930-4

Gladys Linares Fleites, Miguel A. Valera Pérez, José A. Ticante Roldán, Ivo Humberto Pineda Torres y Maribel Castillo Morales. (2007). *Evaluación de clasificadores en estudios de calidad y de degradación de suelos*. En: La Computación en el Siglo XXI, Vol 4 pp 36-41. Fomento Editorial El Poder del Conocimiento, México. ISBN: 9785710898

Valera Pérez Miguel Ángel, Linares Fleites Gladys, Castillo Morales Maribel. (2007). *Evaluación de las características y los procesos que ocurren en los Suelos*. En: La

Computación en Puebla en el Siglo XXI. Volumen 2 Fomento Editorial de la BUAP, México, pp.155-158. ISBN: 968 9182 30-7

Linares F. Gladys, Valera P. Miguel A., Sandoval S. María de L., Cervantes V. Josefina y Castillo M. Maribel. (2005). *Clasificación de suelos forestales de la Sierra Norte de Puebla por el procedimiento de discriminación del vecino más cercano*. En: La Computación en Puebla en el Siglo XXI. Facultad de Ciencias de la Computación. BUAP, México. pp 201-203. ISBN: 968 863 905 2

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a mis padres que siempre han creído en mí, ya que fueron capaces de luchar conmigo a cada momento, apoyándome con todas las fuerzas y recursos a su alcance tan solo por ayudarme a crear mi futuro, porque sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

Parte importante también ha sido mi familia ya que sin su apoyo y ánimos la vida no habría sido tan llevadera.

Otro eslabón fuerte ha sido mis amigos, ya que sin sus consejos, palabras, cariño y apoyo incondicional no habría podido aprender y crecer en su compañía.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por su comprensión, tiempo y apoyo incondicional.

Gracias a mis amigos por la amistad sincera y apoyo en todo momento.

Agradezco a mi gran amigo y asesor el Dr. Raimundo Jiménez Ballesta, por preocuparse e impulsarme siempre para buscar mi propio camino además de enseñarme lo fácil que es hacer investigación de mano de un ser humano tan humilde y entregado a su trabajo.

Gracias a la Dra. Gladys y su esposo, por preocuparse en todo momento por mí e impulsarme para terminar este proyecto.

Gracias al Dr. Jorge Torres Jácome por la amistad y el apoyo incondicional brindados durante todo momento.

Gracias al Maestro Miguel A. Valera y al Maestro Adrián Saldaña por sus enseñanzas continuas, paciencia y apoyo incondicional.

Gracias al Posgrado en Ciencias Ambientales y a la VIEP por el apoyo económico brindado durante estos años de trabajo.

RESUMEN

El cambio climático es un problema con características únicas, ya que es de naturaleza global; sus impactos mayores serán a largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial.

El reconocimiento de la capacidad de los bosques de acelerar o revertir el incremento del CO₂ en la atmósfera de acuerdo a su manejo, ha hecho que se les incluya dentro de los mecanismos de mitigación del cambio climático propuestos por el Protocolo de Kyoto.

Debido al hecho de que no existe información sobre secuestro de carbono por sistemas forestales en el estado de Puebla, México, y en particular, en suelos forestales de la Sierra Norte de Puebla, se hizo necesario iniciar los estudios sobre la variabilidad espacial y temporal del carbono en estos suelos; así mismo, la innovación que representa la estructuración de una metodología aplicable a escala regional y local, debido a las condiciones ambientales, socioeconómicas y de las unidades de suelo que se presentan específicamente en esta zona, da una relevancia especial a esta investigación.

Como paso previo al análisis del carbono orgánico en suelos (COS) de esta zona, se retomó la digitalización de la información cartográfica, tanto de la denominada región RTP – 105 como de la zona de Teziutlán, referente a temáticas como: aguas superficiales, climas, isotermas, isoyetas, geología, vegetación, edafología, la localización de los municipios y la ubicación de los perfiles de suelo.

Se establecieron las bases de datos y se llevaron a cabo los análisis de datos correspondientes en dos momentos del tiempo (1987 y 2009). Bajo el *enfoque de inventarios repetidos* se compararon las estimaciones de carbono orgánico en suelos tomadas en 1987 y en 2009. Este enfoque resultó un método efectivo para determinar los cambios medios de COS en una superficie pequeña de Teziutlán, estado de Puebla, pudiendo probarse la existencia de un incremento de COS, estadísticamente significativo, en 2009 comparado con 1987.

Se constató, a través de la modelación estadística, que el proceso de almacenamiento del carbono, está directamente influenciado por la variabilidad climática, los regímenes de humedad y temperatura detectados, realizándose la dependencia entre ellos en la zona de Teziutlán.

Se consideró recomendable, como una buena alternativa y oportunidad para modificar las prácticas que degradan el medio, y a su vez promover la sostenibilidad de los recursos, la venta de servicios ambientales tales como el secuestro de carbono.

ÍNDICE TEMÁTICO

I. INTRODUCCIÓN	18
I.1 Delimitación espacial	20
I.2 Delimitación temporal	20
I.3 Delimitación semántica	22
I.4 Preguntas de investigación	23
I.5 Objetivos	24
I.6 Hipótesis	24
I.7 Justificación	25
I.8 Antecedentes de la zona de estudio	26
II. MARCO TEÓRICO	28
II.1 El Efecto Invernadero	28
II.2 Gases de Efecto Invernadero	28
II.3. Causas y consecuencias: Cambio Climático Global	29
II.4 Principales fuentes y sumideros	29
II.5 Bosque Templado	30
II.6 Bosque de Pino – Encino	32
II.7 Bosque Mesófilo de Montaña	32
II.8 Bosques como reservorio de Carbono	33
II.9 Ciclo del Carbono	34
II.10 El Carbono en Ecosistemas Forestales	35
II.11 Potencial del Sector Forestal para la Captura de Carbono	35
II.12 Servicios Ambientales	36
II.13 Marco Legal	38
III. MATERIALES Y MÉTODOS	43
III.1 Introducción	43
III.2 Trabajo de gabinete	45
III.2.1 Balance Hídrico	45
III.2.2 Regímenes de Humedad del Suelo	48

III.2.3 Regímenes de Temperatura del Suelo	49
III.2.3.1 Tipos de los Regímenes de temperatura del Suelo	50
III.3 Diseño Experimental	51
III.3.1 Trabajo de campo	51
III.3.2 Muestreo de suelo	51
III.4 Trabajo de laboratorio	53
III.4.1 Preparación de las muestras de suelos para el análisis	53
III.4.2 Preparación de las muestras de hojarasca para el análisis	53
III.4.3 Determinación de las propiedades físicas y químicas en las muestras de suelo	54
III.4.4 Determinación de las propiedades químicas en las muestras de hojarasca	54
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
IV.1 Clima de la Zona de Estudio	56
IV.1.1 Ubicación de las Estaciones Meteorológicas	56
IV.1.2 Análisis de Series de Tiempo	61
IV.1.3 Climogramas	70
IV.1.4 Regímenes de Humedad y Temperatura	74
IV.1.5 Mapas de Isotermas e Isoyetas	75
IV.2 Establecimiento de las Bases de Datos y Análisis de datos (Año 1987)	83
IV.2.1 Análisis descriptivo del carbono en suelos	84
IV.2.2 Regresión PLS de %CO y otras propiedades del suelo	86
IV.2.3 Análisis comparativo del Almacenamiento de Carbono Orgánico en diversos suelos bajo diferentes tipos de Bosques	87
IV.2.4. Distribución Espacial de los Contenidos de Carbono Orgánico	90
IV. 2.5 Estimación del Carbono Orgánico en Suelos según Regímenes de Humedad y Temperatura	92
IV. 2.6 Enfoques de Regresión en el Estudio de la relación del COS y de las variables Climáticas	95

IV.3 Establecimiento de las Bases de Datos y Análisis de Datos (Año 2009)	102
IV.3.1 Fisiografía de la zona	102
IV.3.2 Descripción de los Horizontes Orgánicos del Suelo	105
IV.3.3 Propiedades del Suelo y Bases de Datos	109
IV.3.3.1 Densidad Aparente	109
IV.3.3.2 Materia Orgánica	111
IV.3.3.3 Nitrógeno Total	114
IV.3.3.4 Acidez Hidrolítica e Intercambiable	117
IV.3.3.5 Carbonatos y bicarbonatos	120
IV.3.4 Análisis de los Datos a través de la Regresión Polinomial	122
IV. 3.5 Distribución Espacial del COS	124
IV. 3.6 Hojarasca	126
IV.4 Cambios del Carbono Orgánico en el Suelo entre 1987 - 2009	129
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135
VI. LITERATURA CITADA	138
ANEXOS	149
ANEXO I: Base de Datos 1987	150
ANEXO II: Análisis de normalidad del COS	153
ANEXO III: Regresión PLS	155
ANEXO IV: Análisis comparativo de COS	158
ANEXO V: Gráficos de los residuos para el modelo de regresión	161
ANEXO VI: Comparación de los gráficos de distribución espacial de los COS con isotermas e isoyetas	162

ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig. 1. Mapa de la localización tanto de la RTP – 105, como de la zona de estudio*
- Fig. 2. Estructura del Modelo Presión-Estado-Respuesta. (OECD, 1993)*
- Fig. 3. Esquema de la distribución espacial de los puntos de muestreo definido*
- Fig. 4. Mapa de ubicación de estaciones termo-pluviométricas RTP - 105*
- Fig. 5. Mapa de ubicación de las estaciones termo-pluviométricas correspondientes al periodo A*
- Fig. 6. Mapa de ubicación de las estaciones termo-pluviométricas correspondientes al periodo B*
- Fig. 7. Comportamiento de Temperatura vs Tiempo Periodo A*
- Fig. 8. Grafico de Serie de Tiempo de la Temperatura para el Periodo A*
- Fig. 9. Comportamiento de Temperatura vs Tiempo Periodo B*
- Fig. 10. Grafico de Serie de Tiempo de la Temperatura para el Periodo B*
- Fig. 11. Comportamiento de Temperatura vs Tiempo Periodo C*
- Fig. 12. Grafico de Serie de Tiempo de la Temperatura para el Periodo C*
- Fig. 13. Comportamiento de Precipitación vs Tiempo Periodo A*
- Fig. 14. Grafico de Serie de Tiempo de la Precipitación para el Periodo A*
- Fig. 15. Comportamiento de Precipitación vs Tiempo Periodo B*
- Fig. 16. Grafico de Serie de Tiempo de la Precipitación para el Periodo B*
- Fig. 17. Comportamiento de Precipitación vs Tiempo Periodo C*
- Fig. 18. Grafico de Serie de Tiempo de la Precipitación para el Periodo C*
- Fig. 19. Climogramas correspondientes al periodo A*
- Fig. 20. Climogramas correspondientes al periodo B*
- Fig. 21. Climogramas correspondientes al periodo C*
- Fig. 22. Mapas de Isotermas, estaciones periodo A*
- Fig. 23. Mapas de Isotermas, estaciones periodo B*
- Fig. 24. Mapas de Isotermas, estaciones periodo C*
- Fig. 25. Mapas de Isoyetas, estaciones periodo A*
- Fig. 26. Mapas de Isoyetas, estaciones periodo B*
- Fig. 27. Mapas de Isoyetas, estaciones periodo C*
- Fig. 28. Mapa de ubicación de los puntos muestrales (1987)*
- Fig. 29. Gráfica de cajas de COS (ton/ha) por FORMACIÓN VEGETAL*
- Fig. 30. Mapa de distribución espacial del COS (1987)*
- Fig. 31. Gráfica de cajas entre COS (ton/ha) y Régimen de Temperatura*
- Fig. 32. Gráfica de cajas entre COS (ton/ha) y Régimen de Temperatura*
- Fig. 33. Distribución espacial de los COS con referencia a las isothermas*
- Fig. 34. Distribución espacial de los COS con referencia a las isoyetas*
- Fig. 35. Mapa de muestreo del proyecto*
- Fig. 36. Fisiografía del sitio P30F*
- Fig. 37. Fisiografía del sitio P35F*
- Fig. 38. Fisiografía del sitio P36F*
- Fig. 39. Fisiografía del sitio Piñonero*
- Fig. 40. Fisiografía del sitio Yucca*
- Fig. 41. Horizontes Orgánicos sitio P30F*
- Fig. 42. Horizontes Orgánicos sitio P35F – al lado del macoyo*

- Fig. 42.1. Horizontes Orgánicos sitio P35F – debajo del macoyo*
Fig. 42.2. Horizontes Orgánicos sitio P35F – lejos del macoyo
Fig. 43. Horizontes Orgánicos sitio P36F
Fig. 44 Horizontes Orgánicos sitio Piñonero
Fig. 45 Ausencia de Horizontes Orgánicos sitio Yucca
Fig. 46 Ejemplo de coloración de muestra antes y después de valoración de Materia Orgánica
Fig. 47 Ejemplo de coloración de muestra antes y después de valoración de % Nitrógeno Total
Fig. 48. Ejemplo de valoración de Acidez Hidrolítica
Fig. 49. Ejemplo de valoración de Acidez Intercambiable
Fig. 50. Ejemplo de valoración de Carbonatos y bicarbonatos
Fig. 51. Mapa de distribución del COS (2009)
Fig. 52. Distribución espacial de los COS con referencia a las isotermas
Fig. 53. Distribución espacial de los COS con referencia a las isoyetas
Fig. 54. Grafico para la Comparación entre los Efectos Principales del modelo

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Modelo PER aplicado al proyecto*
Cuadro 2. Relación de propiedades de laboratorio y su técnica de detección
Cuadro 3. Medias Anuales de Temperatura Periodo A
Cuadro 4. Medias Anuales de Temperatura Periodo B
Cuadro 5. Medias Anuales de Temperatura Periodo C
Cuadro 6. Medias Anuales de Precipitación Periodo A
Cuadro 7. Medias Anuales de Precipitación Periodo B
Cuadro 8. Medias Anuales de Precipitación Periodo C
Cuadro 9. Regímenes de Humedad y Térmicos para las estaciones del periodo A
Cuadro 10. Regímenes de Humedad y Térmicos para las estaciones del periodo B
Cuadro 11. Regímenes de Humedad y Térmicos para las estaciones del periodo C
Cuadro 12. Estadísticos Descriptivos de los Datos de C generados
Cuadro 13. Correlaciones de los Datos de C generados
Cuadro 14. Estadísticos Descriptivos de propiedades del Suelo por PROFUNDIDAD (cm)
Cuadro 15. Estadísticos Descriptivos del COS por FORMACIÓN VEGETAL
Cuadro 16. Estadísticos de la Prueba Chi – cuadrada para Regímenes de Temperatura vs Regímenes de Humedad
Cuadro 17. Estadísticos Descriptivos del COS por RÉGIMEN DE HUMEDAD PERÚDICO
Cuadro 18. Estadísticos Descriptivos del COS por RÉGIMEN DE HUMEDAD ÚDICO
Cuadro 19. Ecuaciones de Regresión por combinación Régimen de Temperatura y Humedad
Cuadro 20. Ecuaciones de Regresión del contenido de COS vs Temperatura y Precipitación según Regímenes de Humedad y Temperatura
Cuadro 21. Coeficientes del Modelo de Regresión del Contenido de COS vs Temperatura, Precipitación y niveles de los factores Regímenes de Humedad y Temperatura
Cuadro 22. Ajustes en valores con mayores errores residuales

Cuadro 23. Modelo de regresión lineal mixto en la estimación COS en suelos de Teziutlán según sus regímenes de Temperatura y Humedad

Cuadro 24. Coordenadas de los sitios de muestreo

Cuadro 25. Descripción morfológica de los Horizontes Orgánicos

Cuadro 26. Datos de Densidades Aparentes

Cuadro 27. Datos de Carbono Orgánico en suelo

Cuadro 28. Datos de Nitrógeno en suelo y su relación C/N

Cuadro 29. Datos de pH en suelo

Cuadro 30. Datos de Carbonatos y Bicarbonatos en suelo

Cuadro 31. Temperatura y precipitación para las estaciones del periodo C

Cuadro 32. Ecuaciones de regresión para ln COS vs propiedades del suelo

Cuadro 33. Coeficientes de la regresión

Cuadro 34. Estadísticos del Modelo

Cuadro 35. Análisis de Varianza

Cuadro 36. Ajuste y diagnóstico para observaciones inusuales

Cuadro 37. Datos de Análisis de Hojarasca (2009)

Cuadro 38. Estadísticos descriptivos para COS2009, COS1987

Cuadro 39 A. Análisis de Varianza para la variable respuesta COS

Cuadro 39 B. Coeficientes del modelo lineal general

LISTA DE ABREVIATURAS

AE Evapotranspiración actual

ah Acidez hidrolítica

ai Acidez intercambiable

AL Almadén, Ciudad Real, España

AM Almorox, Toledo, España

%Al y %Fe Contenidos en Aluminio y Hierro activos

BE1 Bosque de Encino 1

BE2 Bosque de Encino 2

BE3 Bosque de Encino 3

BMM Bosque Mesófilo de Montaña

BP Bosque de Pino

BPE Bosque Pino-Encino

BR Bosque de Roble

BTC Bosque Templado Caducifolio

C Carbono

%C Org. Porcentaje de Carbono Orgánico

CaCO₃ Carbonato de calcio

CFC Clorofluorocarbonos

CH₄ Metano

CIC Capacidad de Intercambio Catiónico

CO₂ Dióxido de Carbono

CONABIO Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

CONAFOR Comisión Nacional Forestal

cm Centímetros
CMC Conferencia Mundial sobre el Clima
CMP 7 Conferencia de las Partes para el Protocolo de Kyoto
COP 17 Conferencia de las Partes
COS Carbono Orgánico en Suelos
Cw Clima templado húmedo con estación invernal seca
DA Densidad Aparente
E Estado
EB El Bonillo, Albacete, España
FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI Gases de Efecto Invernadero
Gt Gigatoneladas
ha Hectáreas
INE Instituto Nacional de Ecología
IPCC Panel Intergubernamental de Cambio Climático
Km Kilómetros
Km² Kilómetros cuadrados
Lat. Latitud
m Metros
MB Mirabueno, Guadalajara, España
MOS Materia Orgánica del Suelo
%MO Porcentaje de Materia Orgánica
mm Milímetros
msnm Metros sobre el nivel del mar
Mt Mega toneladas
NaF Fluoruro de Sodio
NE España
%NT Porcentaje de Nitrógeno Total
N₂O Óxido Nitroso
OCDE Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
ONU Organización de las Naciones Unidas
ORPAL Oficina Regional Para América Latina
O₃ Ozono
P Presión
PE Evapotranspiración potencial
pH Potencial Hidrógeno
PER Modelo Presión-Estado-Respuesta
Pue. Puebla
PLS Mínimos Cuadrados Parciales
PNUMA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PSA Programa de Servicios Ambientales
PSA-CABSA Programa de Servicios Ambientales –Programa para el Desarrollo de mercados de Servicios Ambientales por la Protección a la Biodiversidad, la Captura de Carbono y por el Mejoramiento de los Sistemas Agroforestales de Cultivos bajo sombra
R Respuesta
RO Escorrentía
RTP – 105 Región Terrestre Prioritaria 105

SEMARNAT Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG Sistema de Información Geográfica
SMOC Sistema Mundial de Observación del Clima
ST Almacenamiento de agua máximo en el suelo
SU Exceso total de agua en el suelo
t Temperatura
t Toneladas
TM Teziutlán, México
UNFCCC Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático
Ver. Veracruz
VÑ Viñuelas, Guadalajara, España
%V Porcentaje de saturación en bases
W_i Cantidad de agua en el suelo para el mes actual

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la inadecuada utilización de los recursos naturales, la desigualdad social y económica tanto entre los países como al interior de ellos, así como el riesgo de un colapso ambiental, son pruebas de que la humanidad enfrenta una gran crisis mundial (Leff, 1998). La comunidad científica interesada en resolver esta situación ha admitido que los efectos nocivos presentes, tanto a escala local como global, son el resultado histórico de la relación del ser humano con la naturaleza, pero sobretodo del valor que las sociedades le han asignado en términos de su utilidad económica directa e indirecta (Daly, 1997).

Desde la celebración de la “Cumbre de la Tierra” en Río de Janeiro, se ha enfatizado que a fin de alcanzar la conservación y manejo sostenible de los recursos naturales es necesario incorporar una perspectiva integral económico-ecológica, basada en la cuantificación de los bienes y servicios ambientales (Constanza, 1991; Bingham *et al.*, 1995; Belausteguigoitia y Soriano, 1996; FAO, 1999).

Una de las fuentes de mayor número de bienes y servicios ecológicos reconocidos son los ecosistemas forestales, que sufren una pérdida anual cercana al 0.5% (UNEP-GEF, 1999). Las graves consecuencias de su disminución como pérdida de biodiversidad y aumento de gases de efecto invernadero (GEI) (Vitousek, 1994), ha incentivado a nivel mundial al establecimiento de acuerdos generales sobre el manejo y preservación de todos los tipos de bosques (Dixon *et al.*, 1993; FAO, 1999). La diversificación del manejo de los bosques naturales destinados a la producción de madera (FAO, 1999) y el reconocimiento y valoración económica-ecológica de sus bienes y servicios ambientales, constituyen algunos de sus principales desafíos.

Desde hace muy poco tiempo los bosques han adquirido mayor importancia por su participación en la regulación del dióxido de carbono (CO₂) atmosférico (FAO, 1999), el cual es el principal promotor del efecto invernadero y del cambio climático global. El cambio climático es un problema con características únicas, (Martínez *et al.*, 2004) ya que es de naturaleza global, sus impactos mayores serán a largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial.

Los bosques del mundo cubren una superficie total de 3,454 millones de hectáreas, equivalente al 25% de la superficie continental del planeta y constituyen grandes depósitos de carbono. Comparados con otros ecosistemas terrestres como los sistemas agrícolas o las praderas, estos poseen entre 20 y 100 veces más contenido de carbono por unidad de área (Maser, 1995).

Si bien la destrucción de los ecosistemas forestales mundialmente, es la segunda causa de emisión de CO₂ (0.6 y 3.6 giga toneladas de carbono (Gt) de carbono (C) = 109 toneladas (t) de C), actividades enfocadas a la conservación y reforestación de los mismos podrían constituir un valioso sumidero capaz de reducir en los próximos 100 años de entre 1 a 3 Gt de C/año (Maser *et al.*, 1997).

El reconocimiento de esta capacidad de los bosques de acelerar o revertir el incremento del CO₂ en la atmósfera de acuerdo a su manejo, ha hecho que se les incluya dentro de los mecanismos de mitigación del cambio climático propuestos por el Protocolo de Kyoto (PK, 1997), el cual es un acuerdo multinacional que impone a los países industrializados, que en 1990 produjeron cerca del 55% de las emisiones totales de GEI, medidas adicionales y obligatorias respecto a la disminución cuantificada de sus emisiones (Beaumont y Merenson, 1999; INE-SEMARNAT, 2000).

De los mecanismos que existen para la disminución de emisiones, el “Mecanismo para el Desarrollo Limpio” (artículo 12 del Protocolo de Kyoto) es la única vía de cooperación entre los países en vías de desarrollo y los industrializados, teniendo como doble mandato el promover el comercio de créditos certificados para la reducción de emisiones y ayudar al desarrollo sustentable de los países en desarrollo (Brown *et al.*, 2000). A través de este mecanismo y de actividades como el financiamiento de proyectos de reforestación en países en desarrollo, se podrán cumplir parte de los compromisos de reducción de emisiones de GEI en un 5% por debajo de los niveles de 1990 (Beaumont y Merenson, 1999).

Estudios recientes en países de América Latina muestran que el potencial de captura estimado de estos proyectos va de 144 a 723 Megatoneladas de C al año (Mt de C = 106 t de C), con un precio de venta de US\$ 13-42 y un costo menor a los US\$ 10 por tonelada de carbono secuestrada por proyecto (Beaumont y Merenson, 1999).

Debido al hecho de que no existe información sobre secuestro de carbono en sistemas forestales en el Estado de Puebla, México, y en particular, en la zona de Teziutlán, se hizo necesario iniciar los estudios investigativos pertinentes; así mismo, la innovación que representa la estructuración de una metodología aplicable a escala regional y local, debido a las condiciones ambientales, socioeconómicas y de las unidades de suelo que se presentan particularmente en esta zona, brinda especial relevancia al trabajo que se presenta a continuación.

I.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL

El estudio de evaluación del secuestro de carbono en los suelos forestales se realizó en la Región Terrestre Prioritaria 105 (RTP-105), esto de acuerdo con la clasificación de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Arriaga, *et al.*, 2000), en la cual, se describe la zona como aquella localizada en la latitud norte 19°46'23'' a 20°11'55'' y longitud oeste 97° 09'17'' a 97°38'36'', abarcando los estados de Puebla y Veracruz, cuyas localidades de referencia para ambos estados son respectivamente: Teziutlán, Pue.; Zacapoaxtla, Pue.; Cuetzálán, Pue.; Tlapacoyan, Ver. y Altotonga, Ver. Abarcando los siguientes municipios: Acateno, Altotonga, Atempan, Atlequizayan, Atzalan, Ayotoxco de Guerrero, Caxhuacán, Chignautla, Cuetzálán del Progreso, Hueyapan, Hueytamalco, Huitzilán de Serdán, Jalacingo, Jonotla, Nauzontla, Tenampulco, Tetela de Ocampo, Teteles de Ávila Castillo, Teziutlán, Tlapacoyan, Tlatlauquitepec, Tuzamapan de Galeana, Xiutetelco, Xochiapulco, Xochitlán de Vicente Suárez, Yaonáhuac, Zacapoaxtla, Zoquiapan.

La superficie de la región de estudio, zona para el caso específico de este trabajo, es de aproximadamente 5 937.355 Kilómetros cuadrados (Km²). Esta, fue definida como prioritaria para su conservación debido a la existencia de bosques mesófilos de montaña presentes en las cañadas y la selva alta perennifolia en las partes bajas. De esta región, se ha seleccionado la zona de estudio cuya superficie es de 57 Km² aproximadamente, donde se llevó a cabo el presente proyecto (Fig. 1).

I.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL

Con lo que respecta a la cuestión temporal, la información que se analizó en este proyecto fue la generada a partir de 1987, así como la que se generó en el 2009; la primera a la que se hace referencia es la correspondiente a la fecha en que iniciaron los estudios en la región sobre temáticas diferentes, pero se generó información que coincide con algunas de las propiedades que se analizaron en el presente trabajo de investigación, y la segunda fecha es en la que se generó y analizó la información emanada de la parte experimental de esta Tesis Doctoral.

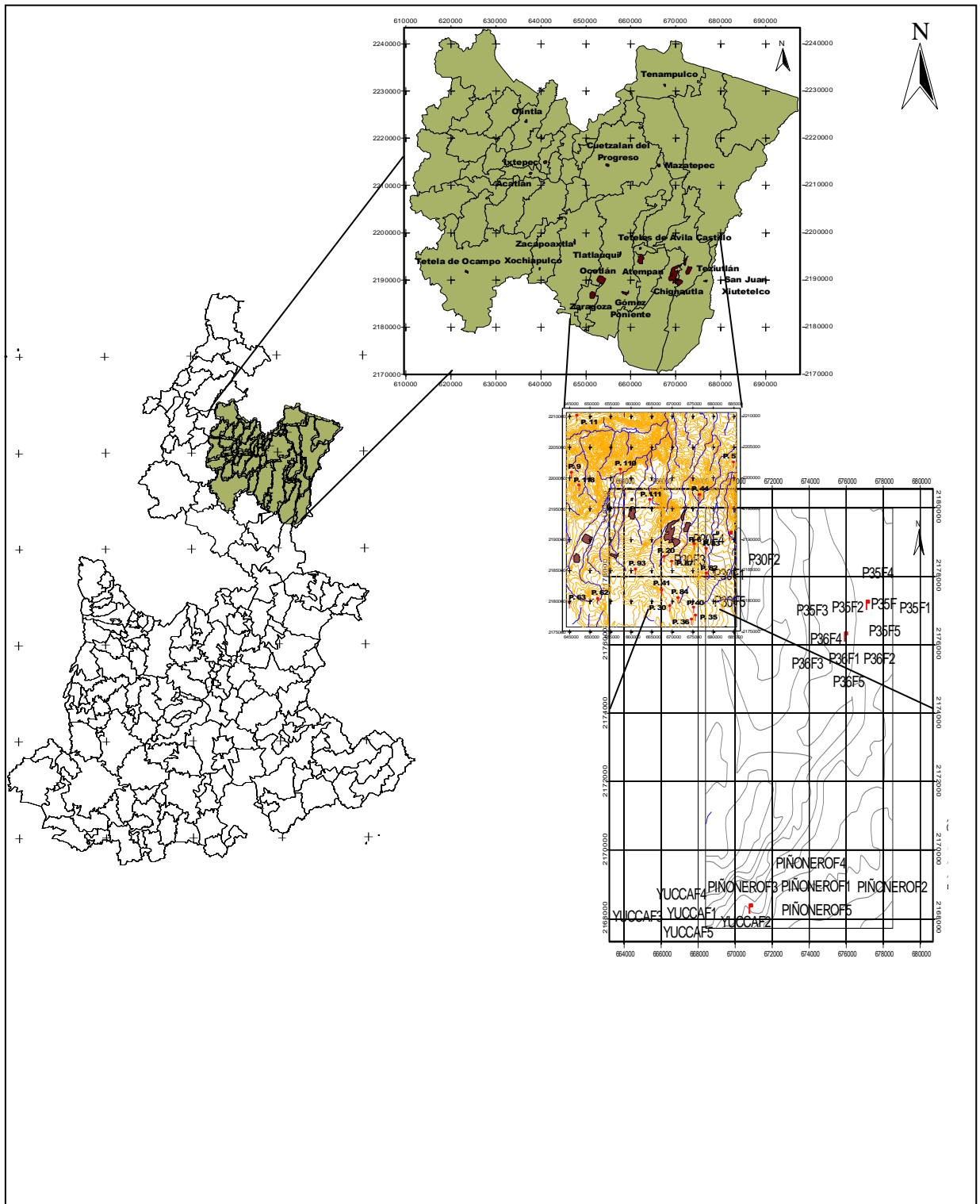


Fig. 1. Mapa de la localización tanto de la RTP – 105, como de la zona de estudio

I.3 DELIMITACIÓN SEMÁNTICA

Suelos Forestales: Estos suelos son formados por intemperismo de la roca madre, donde se encuentran establecidos uno o más ecosistemas forestales, lo cual contribuye al incremento de la reserva de carbono del ecosistema, ya que se caracterizan por la presencia de mantillo u hojarasca.

Secuestro de Carbono en Suelos: Es una parte del ciclo biogeoquímico natural del elemento, el cual es un concepto edáfico que se encuentra relacionado con la fase edáfica del ciclo del carbono.

Variabilidad espacial y temporal: Cuando una determinada propiedad varía en el espacio y también con respecto al tiempo (Manfrinato *et al.*, 2001).

Bosque Templado: Ocupan áreas con precipitación abundante uniformemente distribuida y temperaturas moderadas con un marcado patrón estacional; la flora y la fauna de los Bosques Templados es muy diversificada, se encuentran en áreas de veranos cálidos e inviernos fríos, con precipitación frecuentemente distribuida durante todo el año, pero en algunas áreas es más estacional. La densa cubierta vegetal y veranos cálidos y húmedos permite el desarrollo máximo de materiales orgánicos que forman una bien desarrollada capa de humus, generalmente en suelos limosos, este es un suelo rico y fértil (<http://www.jmarcano.com/nociones/bioma/templado.html>).

De acuerdo con el criterio manejado por Rzedowski (2006), a continuación se presentan las características más sobresalientes sobre los tipos de vegetación que se localizan en la región de estudio del presente trabajo:

Bosque de Quercus: son comunidades vegetales características de las zonas montañosas de nuestro país; junto con los pinares constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de áreas de clima templado y semihúmedo. Típicamente se desarrollan en suelos de reacción ácida moderada (pH 5.5 – 6.5). Su precipitación media anual varía de 350 milímetros (mm) a más de 2000 mm, siendo su distribución promedio de entre 600 y 1200 mm. Sus temperaturas medias anuales con frecuencia varían entre 12 a 20 °C.

Bosque de coníferas: se les encuentra prácticamente desde el nivel del mar hasta el límite de la vegetación arbórea; prosperando en regiones de clima semiárido, semihúmedo y húmedo. Dentro de este, se encuentra el denominado **Bosque de Pinus**. Aunque la mayoría de las especies mexicanas de *Pinus* poseen afinidades hacia los climas templados a fríos y semihúmedos y hacia los suelos ácidos, existen notables diferencias entre una especie y otra y algunas que no se ajustan a estas normas prosperan en lugares calurosos, húmedos a semiáridos. La masa forestal de pinos se desarrolla a altitudes entre 1500 y 3000 metros (m). La caracterización climática en el área de las grandes masas forestales de pino puede aproximarse a los límites de entre 10 y 20 °C al clima templado húmedo con estación invernal seca (Cw) de la clasificación de Koeppen. Muestran notable preferencia por establecerse en suelos derivados de rocas volcánicas y se sabe que toleran mejor los suelos ácidos.

Bosque Mesófilo de Montaña: También conocido como Bosque de Niebla, se refiere al conjunto de ecosistemas afines que se desarrollan en las laderas de las zonas montañosas y cuya principal característica es la alta precipitación pluvial y humedad atmosférica durante todo el año. Corresponde al clima húmedo de altura, y dentro del conjunto de las comunidades que viven en las zonas montañosas, ocupa sitios más húmedos que los típicos de los bosques de *Quercus* y de *Pinus*, generalmente más cálidos que las propias del bosque de *Abies* pero más frescos, que los que condicionan la existencia de los bosques tropicales.

Servicios Ambientales: Los servicios ambientales derivados de los ecosistemas forestales están ligados a la regulación de procesos naturales, como la provisión de agua, mejorar la calidad del aire, control de la erosión del suelo, acervo genético de plantas y animales y como soporte esencial en la mitigación de riesgos naturales. Dichos servicios son de vital importancia para el sostén de las poblaciones urbanas y rurales.

I.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Qué variabilidad puede generarse en los contenidos de carbono orgánico en suelos que soportan vegetación forestal en períodos prolongados de tiempo?
- ¿Cómo es la variabilidad espacial y temporal en el contenido de carbono orgánico en los suelos forestales de la región en estudio, tomando en cuenta los dos momentos de tiempo considerados en este trabajo?
- ¿Cuánto carbono orgánico existe en los sistemas forestales de la región en estudio en los dos momentos de tiempo considerados en este trabajo?

I.5 OBJETIVOS

General:

- Determinar la evolución que ha manifestado el carbono orgánico en los suelos forestales de la Región de Teziutlán en la Sierra Norte de Puebla en los años 1987 y 2009.

Particulares:

1. Analizar la información existente sobre temperatura y precipitación de la región de estudio en tres periodos de tiempo y obtener su caracterización climática.
2. Determinar las variables físicas y químicas del suelo y medio ambiente, y su relación con la formación vegetal y el secuestro de carbono.
3. Establecer modelos sobre secuestro de carbono orgánico en suelos de la zona, que permitan realizar diferentes comparaciones de interés (Año 1987).
4. Establecer la distribución espacial del almacenamiento de carbono orgánico en suelos y su relación con el clima y formular modelos predictivos.
5. Obtención de información reciente sobre el medio físico, horizontes orgánicos del suelo, propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y la hojarasca en una sub-área de la región de estudio.
6. Establecer modelos sobre secuestro de carbono en suelos en relación con las variables climáticas en el periodo actual y la distribución espacial del almacenamiento de carbono orgánico en suelos (2009).
7. Comparar las estimaciones de carbono orgánico en suelos tomadas en 1987 con las tomadas en 2009.

I.6 HIPÓTESIS

En un periodo de 20 años se genera variabilidad en los contenidos de carbono orgánico en suelos que soportan vegetación forestal.

I.7 JUSTIFICACIÓN

Con la ratificación del Protocolo de Kyoto, han surgido muchos problemas técnicos y asuntos políticos que deben ser resueltos si realmente se implementan prácticas, en particular, la ejecución de proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio.

Una de las principales cuestiones técnicas es la definición de métodos y procedimientos para el inventario y monitoreo de los flujos y el secuestro de carbono en el uso actual y potencial del suelo, así como la propuesta de su manejo.

Cuestiones colaterales tales como los efectos del cambio de uso de suelo sobre la biodiversidad y el estado de la degradación del suelo necesitan ser inventariados simultáneamente con el asunto del secuestro de carbono.

Un aspecto relevante en la realización de este proyecto es el aporte que proporcionará, debido al hecho de que no existe información sobre secuestro de carbono por sistemas forestales en la región; así mismo a la innovación que representa la estructuración de una metodología aplicable en escala regional, debido a las condiciones ambientales, socioeconómicas y de las unidades de suelo que se presentan.

Otra implicación de suma importancia es la aplicación de los resultados de este proyecto en la posterior implementación de un proyecto de secuestro de carbono formal, donde las comunidades se verían beneficiadas tanto social como económicamente ya que se obtendrían recursos económicos de la venta de los bonos de carbono a través de los Mecanismos de Desarrollo Limpio.

Todo lo anterior, se vería reflejado de forma directa en la conservación del bioma más característico e importante de la región, pero desgraciadamente frágil, este es el Bosque Mesófilo de Montaña, el cual es muy específico debido a los requerimientos que tiene en humedad, temperatura, etc. Por lo anterior podemos observar la implicación ambiental que tiene el proyecto.

Las sinergias entre las convenciones de las Naciones Unidas sobre Biodiversidad y Desertificación, y el Protocolo de Kyoto deben ser explotadas a fin de promover el cambio de uso de suelo, así como, un manejo del mismo que prevenga su degradación, incrementando el secuestro de carbono y aumentando o conservando la biodiversidad en los ecosistemas terrestres.

Tales prácticas se espera incrementen la seguridad alimentaria local y aminoren la pobreza rural y que sus acciones resulten también en beneficios agregados tales como el pago a las comunidades rurales por diversos servicios ambientales.

En México se tienen localizadas por la CONABIO, las regiones terrestres que son prioritarias para la conservación, éstas son sitios identificados que presentan un alto valor de biodiversidad y fueron definidas utilizando criterios de tipo biológico, de amenaza para el mantenimiento de la biodiversidad y de oportunidad para su conservación.

La región seleccionada identificada por CONABIO como RTP-105 presenta una gran importancia por la existencia de bosques mesófilos de montaña y selva alta perennifolia. El único manchón significativo de selva alta se ubica entre cotas de 200 y 400 msnm y el bosque mesófilo se presenta en las laderas entre los 1200 y 1800 msnm, y bosques de encino en asociación con pino por encima de los 1800 msnm, así como grandes extensiones perturbadas.

Dados los requerimientos ambientales de las vegetaciones de bosque mesófilo de montaña y selva alta perennifolia, existe el problema de un gran nivel de fragmentación que pone en riesgo la persistencia de estos biomas principalmente por el cambio de uso del suelo, de forestal a agrícola y pecuario.

De tal modo que la generación, recopilación y análisis de la información que emane de investigaciones sobre estos biomas es de vital importancia para su conservación. Es por ello que cobra fundamental importancia el modificar las prácticas de manejo de este recurso, motivando una nueva conducta orientada hacia dicha conservación.

Una buena alternativa y oportunidad de modificar prácticas que degraden el medio y a su vez promover la sostenibilidad de los recursos es la venta de servicios ambientales tales como el secuestro de carbono y la protección de las cuencas hidrológicas, acciones ligadas a los objetivos de este proyecto; en otras palabras, el proyecto pretende establecer las bases para la futura venta de servicios ambientales.

Para lograr la venta de servicios ambientales por secuestro de carbono se requiere determinar la cantidad de carbono secuestrado por el suelo en las condiciones actuales de uso. Esta determinación permitiría establecer la línea base de carbono secuestrado y, a partir de ella, evaluar los incrementos de carbono en el sistema cuando se cambia el uso del suelo.

El secuestro de carbono, entonces, tiene una implicación social y económica, además de ambiental, ya que representa una alternativa, en cuestión de mitigación de emisiones de gases de efecto de invernadero pero también podría proporcionar una ayuda económica a las comunidades rurales que se encarguen del secuestro de carbono mediante un programa elaborado al respecto.

Dentro de las metodologías utilizadas actualmente en la realización de proyectos de evaluación e implementación de programas de secuestro de carbono, se encuentran las desarrollada por Ponce *et al.* (2004) y la planteada por Etchevers *et al.* (2005). Ambas han probado ser adecuadas, por lo que se consideran como punto de partida para la realización de investigaciones referentes al tema.

I.8 ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

Como antecedentes del presente proyecto se tienen algunos trabajos que se han llevado a cabo en la zona y que generaron información analítica importante, referentes a temáticas

diferentes a la desarrollada aquí, pero que han servido de apoyo y respaldo a la presente tesis. Por lo anterior se hace mención de estos trabajos, y se presentan a continuación:

- “Fisicoquímica y mineralogía de Andosoles de la Región de Teziutlán, Estado de Puebla”. Miguel Ángel Valera Pérez. Tesis de Maestría en Ciencias (Edafología). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 1993.
- “Determinación de la retención de Fosfatos y de los contenidos de Aluminio y Hierro activos de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona de Oyameles”. Evelia Guadalupe Rojano. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP. 1997.
- “Estudio de la capacidad de retención de fosfatos y contenidos de Al y Fe activos en Suelos Forestales de la región de Teziutlán, Puebla”. Alma Doris Alvarado González. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP. 1998.
- Una reciente publicación del Gobierno del Estado de Puebla titulada “La Biodiversidad en Puebla. Estudio de Estado”, incluye un estudio de caso de la Región de Teziutlán, que ofrece exhaustivamente los antecedentes de la zona de estudio (Valera y Saldaña, 2011).

II. MARCO TEÓRICO

II. 1 El efecto invernadero

Nuestro planeta está rodeado por una delgada capa de gases denominada atmósfera, compuesta por nitrógeno (78.3%), oxígeno (21.0%), argón (0.3%), dióxido de carbono (0.03%) y otros gases en cantidades menores como helio, neón y xenón, de igual forma contiene aerosoles y vapor de agua en concentraciones fluctuantes. Siendo este último responsable de gran parte de los fenómenos meteorológicos (Salati, 1990).

El efecto de invernadero se debe a que ciertos gases en la atmósfera permiten que la mayor parte de la radiación solar incidente penetre hasta la superficie del planeta, (Ordóñez, 1999) mientras que se absorbe y reemite parte de la radiación infrarroja que el planeta regresa al espacio exterior. Cuanto mayor es la concentración de los gases de invernadero, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta emite libremente al espacio exterior. De esta manera, al aumentar la concentración de gases de invernadero, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta.

De mantenerse constantes las concentraciones de los gases de invernadero, la temperatura de la superficie terrestre estaría en equilibrio. Sin embargo, el desarrollo de las actividades humanas ha provocado un desequilibrio al incrementar en unas cuantas décadas las emisiones de componentes como el dióxido de carbono (CO₂), los clorofluorocarbonos (CFC) y otros gases de invernadero.

II.2 Gases de invernadero

El clima de la Tierra está dado por el balance en la radiación que se presenta en la atmósfera, el cual depende, a su vez, de la entrada de energía en forma de radiación solar, la abundancia de gases de efecto de invernadero en la atmósfera, nubes y aerosoles (IPCC, 1992).

Desde la revolución industrial, la concentración de gases de efecto invernadero se ha incrementado rápidamente, sobre todo como resultado de las actividades humanas (Goudie, 1990; IPCC, 1990).

Como ya mencionan Ordóñez *et al.* (2001), diversos autores afirman que el dióxido de carbono es el principal responsable del efecto invernadero (Rodríguez, 2006). Otros GEI se presentan con concentraciones menores, tales como metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), CFC y ozono (O₃).

Muchos de estos gases tienen tiempos de vida (residencia atmosférica) que van desde décadas hasta centenares de años (Ordóñez, 2001), por lo que sus cambios en las concentraciones de la atmósfera responden lentamente como respuesta a los que se dan en las tasas de emisión.

La concentración de 353,000 partes por billón (ppb) del CO₂ en 1990, resultó 25% mayor que en la etapa preindustrial (1750-1800), cuyo valor era de alrededor de 280,000 ppb, y por arriba, a su vez, de cualquier periodo durante los últimos 160,000 años (Goudie, 1990; Masera, 1991).

II.3 Causas y consecuencias: cambio climático global

Se define al **cambio climático** como el posible aumento en la temperatura superficial del planeta que se produciría como consecuencia de un aumento importante y rápido de las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera. La causa fundamental de este incremento es la emisión de estos gases provocados por actividades humanas (antropogénicas) que alteran la composición original de la atmósfera (IPCC, 1995).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático estima que un cambio de las emisiones de GEI que duplique las concentraciones de CO₂ con respecto al nivel preindustrial daría como resultado un incremento de temperatura de 1.5 a 3.5 °C. Este cambio de temperatura provocaría, a su vez:

i) cambios en los patrones mundiales de precipitación pluvial.

ii) elevación del nivel del mar de 0.2 a 0.6 metros, tanto por la expansión térmica de los océanos como por el derretimiento parcial de glaciares en montañas y de la capa de hielo en regiones polares estimándose un desprendimiento de 200 Kilómetros (Km) de masas de hielo.

iii) cambios en la humedad del suelo al aumentar la evaporación del agua.

Estos tres factores afectarían directamente todas aquellas actividades humanas que dependen de la precipitación, la temperatura, la humedad y de los cuerpos de agua. El producto de esta alteración sería equivalente a desplazar una región cualquiera en 200 Km de latitud, provocando, la migración de las comunidades de las zonas costeras al interior de los continentes y cambios en el uso del suelo, con las consiguientes crisis de tipo social, económico y político.

II.4 Principales fuentes y sumideros

De acuerdo con las estimaciones se sabe que el CO₂ es el responsable del 71.5% del efecto de invernadero (Rodríguez, 2006). Por esta razón, en lo que resta del trabajo se centrará la atención en este.

El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son considerados a nivel mundial como las dos principales fuentes netas de emisiones de CO₂ a la atmósfera relacionadas con el cambio climático global (Mintzer, 1992), siendo la última de éstas, la que presenta una contribución más pequeña pero significativa.

Las emisiones de CO₂ correspondientes a los combustibles fósiles anuales han aumentado en promedio 6.4 Gt de C por año (de 6.0 a 6.8) con una media de 23.5 Gt de CO₂ (de 22.0 a 25.0) en los años 90, a unos valores de 7.2 Gt de C por año (de 6.9 a 7.5) con una media de 26.4 Gt de CO₂ (de 25.3 a 27.5) en el periodo correspondiente a 2000-2005. Por otro lado y no menos importantes, se encuentran las emisiones medias de CO₂ asociadas con el cambio de uso de suelo en los 90 que se estima que fueron de 1.6 Gt de C por año (de 0.5 a 2.7) con una media de 5.9 Gt de CO₂ (de 1.8 a 9.9) (IPCC, 2007).

Los bosques, a través de sus procesos fisiológicos como la fotosíntesis, absorben 110 Gt de C año⁻¹, mientras que mediante la respiración emiten 55 Gt de C año⁻¹ y por medio de la descomposición emiten de 54 a 55 Gt de C año⁻¹. El suelo, los detritus y la turba almacenan 172 Gt de C aproximadamente. Los océanos absorben aproximadamente 93 Gt de C año⁻¹ y emiten por procesos químicos y biológicos cerca de 90 Gt de C año⁻¹, además de que se considera que conservan grandes cantidades de carbono (38,500 Gt de C). Estos dos ciclos eliminan de la atmósfera casi tanto carbono como el que le aportan de forma natural; pero actividades humanas como la deforestación y la quema de combustibles fósiles están provocando un aumento en la cantidad de carbono atmosférico en unos 3 Gt de C año⁻¹ (Bolin *et al.*, 1996).

II. 5 Bosque Templado

En nuestro país, los bosques existentes incluyen varios tipos de vegetación, pero predominan los bosques de pino y de encino o una mezcla de ambos. México es el país más rico en especies de pino y de encino a nivel mundial, esto es producto de la gran variedad de climas presentes en el país y dentro de la zona templada. Se calcula que en México existen alrededor de 50 especies diferentes de pinos y cerca de 150 especies de encinos. A estas regiones de bosque también se les denomina zonas templadas y dentro de ellas en México hay regiones muy limitadas como son la vegetación alpina, que es la que está por encima de los 3,100 m de altitud en las faldas de los grandes volcanes como el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl y el Pico de Orizaba. Estos tipos de vegetación son reconocibles pues abarcan los zacatonales (áreas de pasto tipo zacate) de los volcanes en los que se desarrollan especies muy especiales como el “zacatuche” o conejo de los volcanes, que es una especie única de los volcanes y actualmente en peligro de extinción.

Sin embargo, la mayoría de los bosques templados están a una altura entre 1200 y 3000 msnm. Esto hace que los bosques se encuentren distribuidos en las grandes cadenas montañosas, como la Sierra Madre Oriental y la Occidental, la Faja Volcánica Transmexicana (que incluye al volcán Ajusco y Chichinautzin al sur de la Ciudad de México) y las sierras del sur en Oaxaca y Chiapas. Dichos bosques se caracterizan por ser cerrados y sólidos, compuestos por encinos y pinos.

Por desarrollarse en climas sub-húmedos los bosques templados, incluyen otras especies muy importantes de coníferas como los oyameles, los juníferos y los cipreses. El oyamel es especialmente importante ya que es el que más se usa como árbol de navidad y es la especie preferida por la mariposa monarca durante su migración. Los juníferos y cipreses también son importantes ya que gracias a su gran adaptabilidad, se utilizan para reforestar áreas o

como árboles de ornato. Toda esta diversidad de especies hace que en los bosques templados encontremos una variedad de combinaciones de plantas y árboles, según la topografía del terreno. En zonas secas probablemente encontraremos pinos y encinos. En la misma región pero en cañadas más húmedas encontraremos oyameles. En otros casos encontraremos una mezcla de las tres o más especies.

Otro tipo de bosque templado muy importante por su capacidad para captar agua del ambiente es el bosque mesófilo de montaña, en el cual viven los quetzales (ave en que los machos tienen una larguísima y bella cola) que se distribuyen principalmente a lo largo de la Sierra Madre Oriental y Sierra Madre de Chiapas.

Además de los árboles, los bosques templados albergan muchas plantas en forma de arbustos de menor tamaño. Este “estrato arbustivo” es muy importante ya que mantiene la humedad del suelo, evita su erosión además de que tiene muchas especies de plantas que contienen propiedades medicinales (por ejemplo el té de monte y el gordolobo).

También al nivel del suelo existe un estrato rasante, en el que viven musgos, líquenes y hongos. En algunos casos este estrato puede ser muy húmedo, siendo los musgos esponjas retendedoras de agua. En estas condiciones los hongos proliferan en muchas formas y colores. Muchos de estos hongos son comestibles y los aprovechan las comunidades rurales.

En general, los bosques de coníferas (pino y oyamel principalmente) son bosques siempre verdes y resistentes a heladas, a largos períodos de sequía, a incendios forestales así como al pastoreo y a cierto maltrato. Esto se debe a la gran capacidad de regeneración de este ecosistema y al rápido crecimiento de muchas especies, principalmente de pinos. Cada especie cuenta con estrategias de supervivencia; como por ejemplo, el hecho de que las hojas de los pinos sean alargadas (mejor conocidas como agujas por su aspecto largo y delgado) permite que sobrevivan largos períodos sin agua sin que se sequen.

Otra estrategia consiste en que cuando un insecto (plaga) ataca un árbol, éste produce grandes cantidades de resina (sustancia pegajosa y viscosa) en la cual queda atrapado e inmobilizado el insecto evitando mayor daño. Por cierto que es gracias a estos insectos atrapados en la resina que se ha podido estudiar la composición genética de estos insectos que existieron en la edad de los dinosaurios y han permitido descifrar grandes misterios de esas épocas.

La altura de los bosques es variable. En la mayor parte de los casos oscila entre los 8 y 25 m pero puede llegar a alcanzar los 40 m. En México también hay pinos enanos que viven en ciertas zonas aisladas y sujetas a fuertes vientos. Este es el caso del *Pinus culminicola*, que vive en el cerro del Potosí en Nuevo León y que forma un bosque único en el mundo que vale la pena conocer y proteger.

En cuanto a fauna de los bosques es importante señalar que en estos lugares se encuentran el mayor número de vertebrados (animales con esqueleto interno) endémicos (únicos en el mundo) en comparación con el resto de los ecosistemas terrestres de México (excepto

aves). Sin embargo algunos de estos animales se encuentran amenazados o en peligro de extinción (<http://www.eambiental.org>).

II.6 Bosque de Pino - Encino

Comunidad de bosque ampliamente distribuida que ocupa la mayor parte de la superficie forestal de las porciones superiores de los sistemas montañosos del país, la cual está compartida por las diferentes especies de pino (*Pinus* spp.) y encino (*Quercus* spp.); dependiendo del dominio de uno y otro, se le denomina pino-encino si predominan las coníferas y es llamado encino-pino cuando dominan los encinares. La transición del bosque de encino al de pino está determinada (en condiciones naturales) por el gradiente altitudinal. Estas mezclas son frecuentes y ocupan muchas condiciones de distribución.

Este ecosistema se distribuye principalmente en las cadenas montañosas de la Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Transmexicana, la Sierra Madre del Sur, las sierras de Chiapas, Oaxaca y Baja California.

Algunas de las especies más comunes son pino chino (*Pinus leiophylla*), pino de las cumbres (*P. hartwegii*), pino ocote blanco (*P. montezumae*), pino lacio (*P. pseudostrobus*), pino amarillo (*P. rudis*), pino escobetón (*P. michoacana*), pino chino (*P. teocote*), ocote trompillo (*P. oocarpa*), pino ayacahuite (*P. ayacahuite*), pino (*P. pringlei*), pino de Durango (*P. duranguensis*), pino prieto (*P. chihuahuana*), pino real (*P. engelmannii*), pino apache (*P. lawsoni*), (*P. oaxacana*); encino laurelillo (*Quercus laurina*), encino (*Q. magnoliifolia*), encino blanco (*Q. candicans*), roble (*Q. crassifolia*), encino quebracho (*Q. rugosa*), encino tesmilillo (*Q. crassipes*), encino cucharo (*Q. urbanii*), charrasquillo (*Q. microphylla*), encino colorado (*Q. castanea*), encino prieto (*Q. laeta*), laurelillo (*Q. mexicana*), *Q. glaucooides*, y *Q. scytophylla*.

El uso de estas comunidades es el de conservación del recurso forestal, así como las plantaciones comerciales para aprovechamiento maderable y resinífero, los cuales suministran a la industria una variedad de materias primas de gran importancia económica como son pulpa para papel, celulosa, madera para la elaboración de varios productos, resina para la fabricación de brea, pinturas y aguarrás, además de proporcionar leña, madera para aserrío, para construcción, puntales, postes y durmientes.

II. 7 Bosque Mésófilo de Montaña

El Bosque Mesófilo de Montaña también conocido como Bosque de Niebla se refiere al conjunto de ecosistemas afines que se desarrollan en las laderas de las zonas montañosas y cuya principal característica es la alta precipitación pluvial y humedad atmosférica durante todo el año.

Diferentes autores han dado nombres distintos a este ecosistema. Algunos de los nombres más utilizados son: bosque caducifolio, bosque de neblina, bosque mesófilo de montaña,

selva baja o mediana perennifolia, bosque de niebla y nubiselva (<http://www.libramientoxalapa.org/docu/bosque/bosques.html>).

Cuenta con una vegetación densa, propia de laderas montañosas que se encuentran protegidas de los fuertes vientos y de excesiva insolación donde se forman las neblinas durante casi todo el año, también crece en barrancas y otros sitios resguardados en condiciones más favorables de humedad. En él es notable la mezcla de elementos arbóreos con alturas de 10 a 25 m o aún mayores, y la mayoría de sus componentes son de hoja perenne.

También se encuentran los árboles caducifolios que en alguna época del año tiran sus hojas, es común la presencia de plantas trepadoras y epifitas debido a la alta humedad atmosférica y abundantes lluvias. Generalmente se encuentran entre los 800 a 2400 m. Son muchas las especies que lo forman pero las más comunes son: micoxcuáhuatl (*Engelhardtia mexicana*), lechillo (*Carpinus caroliniana*), liquidambar (*Liquidambar styraciflua*), encino, roble (*Quercus* spp.), pino, ocote (*Pinus* spp.), tila (*Ternstroemia pringlei*), jaboncillo (*Clethra* spp.), *Podocarpus* spp., *Styrax* spp., *Chaetoptelea mexicana*, *Junglans* spp., *Dalbergia* spp., *Eugenia* spp., *Ostrya virginiana*, *Meliosma* spp., *Chiranthodendron pentadactylon*, *Prunus* spp., *Matudea trinervia* y una gran variedad de epifitas (<http://www.conafor.gob.mx>).

Se trata de un ecosistema amenazado ya que su distribución natural en México es muy limitada, originalmente cubrió el 1% de la superficie del país; esto es, alrededor de 2 millones de hectáreas por lo que siempre ha sido un ecosistema escaso, sin embargo, hoy queda sólo la mitad.

Se trata de un ecosistema frágil. Esta variedad de bosque es una comunidad arbórea densa, integrada por una mezcla de árboles caducifolios de clima templado en el dosel, en tanto que en el sotobosque prevalecen las especies tropicales perennifolias, por lo anterior es evidente que interactúan tanto vegetación con afinidad boreal pero también de tipo andino (Challenger, 1998). Las orquídeas y los helechos son muy abundantes. Su requerimiento de alta humedad atmosférica y abundantes lluvias lo hace un ecosistema muy vulnerable a los cambios regionales en el clima provocados por la deforestación y la tala inmoderada.

Por sus características climáticas estas áreas son utilizadas con agricultura de temporal permanente de café o agricultura nómada, además de utilizar la madera de los diversos árboles o bien para la explotación ganadera, principalmente de ganado vacuno, para lo cual la eliminan, introduciendo pastos cultivados e inducidos.

II.8 Bosques como reservorios de carbono

La superficie forestal estimada en la Tierra es de 4.1×10^9 ha, donde las áreas naturales protegidas abarcan el 2.3%, menos del 10% de las áreas que se encuentran bajo manejo. Aproximadamente el 37% de carbono se encuentra en latitudes bajas (0° a 25° Lat.), 14% en las medias (25° a 50° Lat.) y 49% en las altas (50° a 75° Lat.). Dos terceras partes del carbono en ecosistemas forestales se encuentra contenido en el suelo.

En los ecosistemas forestales boreales, la biomasa, el detritus, la turba (con 419 Gt de C) y el suelo (con 290 Gt de C) contienen en su totalidad 709 Gt de C. Los bosques tropicales almacenan en la vegetación y el suelo 159 Gt de C y 216 Gt de C, respectivamente, para un total de 375 Gt de C (Brown, *et al.*, 1993).

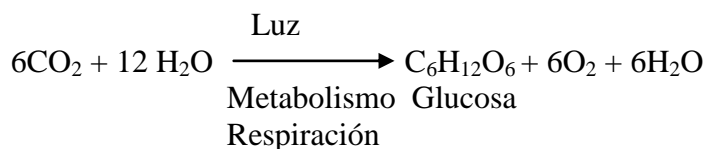
Actualmente la deforestación y la degradación forestal son factores importantes para el cambio climático global, puesto que producen emisiones netas de CO₂. Además generan grandes problemas locales y regionales, como el incremento de la erosión y el abatimiento de los mantos acuíferos, entre otros. Sin embargo, se ha estimado que, combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en todo el mundo, los bosques podrían resultar en un sumidero neto de carbono durante los próximos cien años, permitiendo reducir de 20 a 50% de las emisiones netas de CO₂ a la atmósfera (IPCC, 1995).

Por lo anterior, es necesario conservar los bosques y manejarlos adecuadamente, y comenzar a reforestar en zonas altamente degradadas, permitiendo una regeneración de la cobertura vegetal acorde al tipo de suelo, fisonomía del terreno y cercanía de cuerpos de agua, e integrando este proceso en todo momento a las actividades agrícolas y pecuarias de una región determinada (Ordóñez, 1999).

II. 9 Ciclo del carbono

El ciclo comienza cuando las plantas, a través de la fotosíntesis y utilizando la clorofila como catalizador, emplean el CO₂ que está presente en la atmósfera o disuelto en el agua; al descomponerse el CO₂, el carbono pasa a ser parte de los tejidos vegetales en forma de hidratos de carbono (glucosa), grasas y proteínas, pues todas las moléculas orgánicas están formadas por cadenas de carbono, mientras que el oxígeno es reintegrado a la atmósfera o al agua mediante la respiración a través de las raíces y las hojas.

Fotosíntesis



Así, el carbono pasa a los herbívoros que consumen plantas y de ese modo, lo utilizan y degradan en compuestos de carbono. Una parte de estos, se almacena en los tejidos animales de los herbívoros y por medio de la depredación llega a los carnívoros, sin embargo parte de este carbono es liberado en forma de gas, mediante la respiración de los seres vivos, produciendo de este modo CO₂ (www.ciceana.org.mx). Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en CO₂ y regrese a la atmósfera (Schimel, 1995; Smith *et al.*, 1993). La fijación de carbono por bacterias y animales es otra manera de disminuir la cantidad de CO₂, aunque cuantitativamente menos importante que la fijación de carbono por las plantas.

Los seres vivos que habitan en el medio acuático toman el CO₂ del agua, ya que la solubilidad de este gas en el agua es muy superior a la de otros gases, tales como el oxígeno o el nitrógeno. En los ecosistemas marinos algunos organismos convierten parte del CO₂ que toman, en carbonato de calcio (CaCO₃) que necesitan para formar sus conchas, caparazones o sus esqueletos como en el caso de los arrecifes. Cuando estos organismos mueren, sus estructuras se depositan en el fondo formando rocas sedimentarias calizas en las que el carbono queda retirado del ciclo durante miles y hasta millones de años, regresando lentamente de nuevo al ciclo, cuando las rocas se van disolviendo.

Aunque también cabe mencionar que las actividades volcánicas y los incendios forestales espontáneos, son considerados como emisores de CO₂ a la atmósfera.

II. 10 El carbono en ecosistemas forestales

Como ya se mencionó, el CO₂ se descompone y forma parte de los tejidos vegetales de los árboles participando en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento (que en su conjunto conforman la copa) así como la altura y grosor de su tronco. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas, lo que da lugar a que las copas de los árboles compitan por esta energía. Esto origina, a su vez, un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, éste, a su vez, aporta nuevamente CO₂ al entorno.

Simultáneamente, los troncos de los árboles, al ir aumentando su diámetro y altura alcanzarán un tamaño que sea aprovechable en términos comerciales.

Durante el tiempo en que el C (que al incorporarse y ser transformado mediante el metabolismo vegetal) se encuentra constituyendo alguna estructura en el árbol —y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera—, **se considera almacenado**. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa) el CO₂ fluye para regresar a la atmósfera.

II. 11 Potencial del sector forestal para la captura de carbono

Bajo una adecuada política de apoyo, el sector forestal en nuestro país tiene la capacidad de reducir el crecimiento de las emisiones de CO₂ generadas por el sector energético, convirtiéndose en una de las opciones de mitigación más importantes a corto y mediano plazo.

Masera (1995c) define las opciones de mitigación de carbono como: cualquier acción que da como resultado una reducción del incremento neto en las emisiones de este gas de un área determinada y/o por la sustitución de combustibles fósiles. Asimismo, identifica dos

opciones básicas de mitigación de carbono en el sector forestal: **a) conservación**, que consiste en evitar las emisiones de carbono preservando las áreas naturales protegidas, **fomentando el manejo sostenible de bosques naturales y el uso renovable de la leña, y mediante la reducción de incendios; y (b) reforestación**, dedicada a recuperar áreas degradadas mediante acciones como **la protección de cuencas**, la reforestación urbana, la restauración para fines de subsistencia (leña), el desarrollo de plantaciones comerciales para madera, pulpa para papel, hule, etc., así como de las plantaciones energéticas (producción de leña y generación de electricidad) y de los sistemas agroforestales. Acciones como éstas tienen por objetivo incrementar la fijación y almacenaje de carbono.

En resumen, la primera meta podría ser alcanzada evitando la degradación y aclareo de las áreas forestales. Esto usualmente se lleva a cabo mediante el cuidado propio de las áreas naturales protegidas y del manejo sustentable de los bosques nativos. Las emisiones de carbono también pueden ser evitadas por la quema de biomasa cosechada de forma sustentable, en lugar del uso de combustibles fósiles para energía y la sustitución de productos industriales en proceso, que requieren del uso de combustibles fósiles, por productos hechos de madera, por ejemplo sustituyendo cemento por madera. El segundo aprovechamiento incluye el incremento de la densidad de carbono en un área dada y/o los sumideros y almacenes de carbono.

II. 12 Servicios Ambientales

Los ecosistemas forestales no sólo son fuente de materias primas, sino que brindan además una serie de **servicios ambientales de vital importancia para el sostén de las poblaciones urbanas y rurales.**

Los bosques son importantes productores del oxígeno que respiramos. Esto se debe al proceso de fotosíntesis en el que las plantas y árboles utilizan el carbono que esta disuelto en el aire en forma de dióxido de carbono y lo transforman e incorporan a sus tejidos; como producto secundario de este proceso liberan oxígeno a la atmósfera. Al llevar a cabo este proceso quitan carbono de la atmósfera el cual ha ido aumentando por las industrias contaminantes o la quema de los bosques. Los bosques, por lo tanto, son importantes reguladores de la calidad del aire y disminuyen el calentamiento global. **Y mediante un programa adecuado de manejo sustentable del recurso las familias pueden tener un sostén.**

Los bosques también nos proveen de agua, la cual captan de la atmósfera al atraer la lluvia o captar la humedad del ambiente. Esto sucede porque las zonas arboladas con bosques de las montañas detienen la humedad que proviene generalmente del mar. Ahí se lleva a cabo una acumulación de nubes cargadas de agua, quienes la liberan encima de estas regiones. Al contar con un buen sistema de filtrado a través del suelo, el agua llega hasta los acuíferos en el subsuelo que a su vez son la cuna de ríos y lagos de donde nos proveemos de agua. Generalmente los servicios ambientales los tomamos como un hecho y no los valoramos.

En años recientes se han hecho esfuerzos por poner un valor a esos servicios para que los usuarios lo paguen de manera justa y los recursos generados sean invertidos en la conservación y manejo de las áreas que los generan. Tal es el caso de la ciudad de Saltillo, en donde recientemente se ha instrumentado un mecanismo de pago-por-servicio de agua entre los usuarios del agua y el sitio en donde se genera esta, que es la Sierra de Zapalinamé. De manera voluntaria los usuarios han acordado donar a través de sus recibos de agua un monto que se destina a la conservación y protección de la Sierra, logrando de tal manera “pagar” al ecosistema el “servicio” de producción de agua.

Un solo árbol de los bosques de niebla en las montañas de Veracruz, es capaz de captar y escurrir hasta 100 litros de agua por hora, a partir de la humedad que capta del ambiente. (<http://www.eambiental.org>)

Además los *bosques son importantes productores de suelo*, es decir, a través del proceso de interacción y desarrollo de especies se generan desechos (hojas, animales muertos, frutos, ramas) que al caer al suelo y ser descompuestos por bacterias forman el suelo. Este suelo, que se conoce en forma de tierra es el sustrato sobre el cual crecen la gran mayoría de las plantas y sin el cual serían imposibles los procesos de crecimiento y desarrollo de los bosques y por lo tanto de los servicios ambientales que nos proveen.

Otro servicio valioso que recibimos de los bosques templados es la recreación. Debido a su clima agradable y a su belleza escénica, millones de mexicanos disfrutamos ir a los bosques en fin de semana. En los bosques jugamos, hacemos deporte, exploramos y liberamos las tensiones de la vida urbana.

Por todo lo anterior es claro que los bosques mejoran nuestra calidad de vida. *El aprovechamiento económico (usos) de los bosques templados*, en especial los de pino y encino, *es una práctica que tiene miles de años de antigüedad en México*; desde la prehistoria y las primeras culturas prehispánicas, hasta nuestros tiempos. El aprovechamiento de los bosques ha sido un factor constante en el desarrollo del hombre, ya sea nómada o sedentario.

Los bosques también son surtidores de madera aserrada con la cual se producen muebles, casas, juguetes y muchos otros productos; los bosques también proveen pulpa para producir papel. El bosque nos provee también de muchos otros productos llamados “no maderables” que son plantas medicinales, hongos y la llamada “tierra negra”.

Otros productos que se extraen son plantas medicinales, musgo para adornar nacimientos, conos de pinos, tierra de hoja, hongos comestibles y ramas para escobas. La extracción de la mayoría de estos productos no está cuantificada pero representa una parte muy importante de la economía en zonas rurales y sub-urbanas.

Como podemos observar y de manera general los servicios ambientales derivados de los ecosistemas forestales están ligados a la regulación de procesos naturales, como la provisión de agua, mejorar la calidad del aire, control de la erosión del suelo, acervo genético de plantas y animales y como soporte esencial en la mitigación de riesgos naturales.

Con el fin de impulsar el reconocimiento de la multifuncionalidad de los ecosistemas forestales y agroforestales, el Gobierno Mexicano ha establecido el compromiso de promover la conservación de las áreas forestales, y de los servicios ambientales que éstas proveen, así como incentivar su mantenimiento a través de una estrategia de generación de mercados de Servicios Ambientales. Como parte de esta estrategia, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) emprendió dos iniciativas: el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos en el 2003, y el Programa de Servicios Ambientales –Programa para el Desarrollo de mercados de Servicios Ambientales por la Protección a la Biodiversidad, la Captura de Carbono y por el Mejoramiento de los Sistemas Agroforestales de Cultivos bajo sombra (PSA-CABSA) en 2004. Ambos con la finalidad de otorgar apoyos económicos a los dueños y/o legítimos poseedores de terrenos con recursos forestales por los servicios ambientales que generan.

En el 2006, los dos Programas mencionados han sido fusionados bajo un solo concepto de apoyo denominado *Servicios Ambientales* y los apoyos otorgados bajo este concepto deberán ser destinados a promover y desarrollar el mercado de los siguientes servicios ambientales: Hidrológicos, Captura de Carbono y los derivados de la protección a la Biodiversidad.

II.13 Marco legal

De acuerdo con la problemática abordada en este proyecto, es importante hacer referencia a las regulaciones legales Internacionales que se han desarrollado alrededor del tema, además de observar la concordancia que ha materializado nuestro País a este respecto, lo cual nos da un mejor panorama para lograr un mejor entendimiento del tema.

Durante los años 70's, de forma general se habló por primera vez sobre el concepto de calentamiento mundial; se creó el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA 1972), posteriormente en 1974 se estableció la Oficina regional del PNUMA para América Latina y el Caribe (ORPAL) con sede en la Ciudad de México. De igual manera se establecieron oficinas Regionales en otras partes del mundo; se llevó a cabo la primera Conferencia Mundial sobre el Clima (CMC, Ginebra 1979).

En la época de los 80's, se estableció el programa mundial sobre el clima proporcionando el marco de referencia para la cooperación internacional en investigación y la plataforma para identificar las cuestiones climáticas más importantes de los años ochenta y noventa, entre las que cabe mencionar el agotamiento del ozono y el calentamiento mundial; se llevó a cabo la conferencia sobre los cambios climáticos y el efecto de invernadero en Villach, Austria (1985); por otro lado una resolución de las Naciones Unidas consideró el cambio climático como una “preocupación común de la humanidad” (1987) y se estableció el grupo Intergubernamental de Expertos sobre cambios climáticos en 1989.

En los años 90's, el primer informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) advirtió sobre el inminente calentamiento mundial, de igual forma se llevó a cabo la segunda conferencia mundial sobre el clima (1990) y se creó el

sistema mundial de observación del clima (SMOC) en el mismo año; en 1992 se llevó a cabo la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo humano, surgiendo varios documentos importantes entre ellos el Programa 21 y la declaración de principios para el manejo sostenible de los bosques en Río de Janeiro, en el mismo año se firmó el convenio marco de las naciones unidas sobre los cambios climáticos; posteriormente en 1995 se realizó la segunda evaluación del IPCC que fungió como incentivo importante para el protocolo de Kyoto y finalmente en 1997 se abrió para su firma el protocolo de Kyoto por lo que en la Cumbre de la Tierra +5 se revisó la implementación del programa 21.

Del 2000 – 2004, el Secretario General de la ONU presentó las propuestas en la Cumbre del Milenio donde se incluyó el cambio climático, diciéndose que debía adoptarse y ratificarse el Protocolo de Kyoto para que entrara en vigor antes de 2002 y así asegurar que se alcanzaran sus metas, como un paso hacia la reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero; en el 2001 el IPCC publicó su tercera evaluación en la que se estimó un mayor calentamiento mundial y finalmente se llevó a cabo la evaluación de ecosistemas del milenio incluidos los bosques en el mismo año.

Adentrándonos un poco más y puntualizando sobre algunos eventos de vital importancia, cabe hacer mención de lo siguiente.

En la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sustentable, se reafirmó el compromiso de fortalecer y mejorar la gobernanza en todos los planos para lograr la aplicación efectiva del Programa 21, los objetivos de desarrollo del Milenio y el Plan de Aplicación de las Decisiones de la Cumbre; así mismo debían formularse políticas y medios para mejorar el acceso de los pueblos indígenas y de sus comunidades a las actividades económicas y aumentar su empleo adoptando, medidas de fomento para la capacitación, la asistencia técnica y el crédito; de igual forma que era de vital importancia reconocer que la dependencia tradicional y directa de los recursos y ecosistemas renovables, incluido su aprovechamiento sostenible, era esencial para el bienestar cultural, económico y físico de las poblaciones indígenas y de sus comunidades; así mismo debían aplicarse estrategias de transporte orientadas al desarrollo sostenible, que tuvieran en cuenta las condiciones existentes a nivel regional, nacional y local a fin de mejorar la accesibilidad económica, la eficiencia y la comodidad del transporte, así como la calidad del aire y la salud pública en las zonas urbanas, y de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, incluso mediante el desarrollo de tecnologías del transporte automotor más racionales desde el punto de vista ecológico, de costo accesible y socialmente aceptables; en ese momento se ratificó y se señaló que el cambio climático y sus efectos adversos eran una preocupación de toda la Humanidad; se reafirmó el compromiso de alcanzar el objetivo último de la Convención, que era estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que evitase interferencias antropógenas peligrosas para el sistema climático, recordando la Declaración del Milenio, en que los Jefes de Estado y de Gobierno resolvieron hacer todo lo posible por que el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que entraría en vigor, de ser posible antes del décimo aniversario de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo celebrada en 2002, y que se iniciaría la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Otro punto de suma importancia fue que los países que ratificaron el

Protocolo de Kyoto exhortaron firmemente a los que no lo habían hecho y finalmente se reconoció que los ecosistemas montañosos sustentan formas particulares de subsistencia y contienen importantes recursos relacionados con las cuencas hidrográficas, la diversidad biológica y una flora y una fauna singulares.

Con respecto a la Agenda XXI, se hizo referencia a que se tenían presentes también que las actividades que se realizaran para alcanzar los objetivos del capítulo 9 de la misma, deberían coordinarse con el desarrollo social y económico en forma integral con el fin de evitar que tuviesen repercusiones negativas, teniendo plenamente en cuenta las legítimas necesidades prioritarias de los países en desarrollo con respecto respecta al logro del crecimiento económico sostenido y la erradicación de la pobreza debiéndose promover la utilización de los recursos marinos y terrestres y las prácticas apropiadas de aprovechamiento de la tierra que contribuyeran a: La reducción de la contaminación atmosférica y/o la limitación de las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero; la conservación, la gestión sostenible y el mejoramiento, según proceda, de todos los sumideros de gases de efecto invernadero, la conservación y la utilización sostenible de los recursos naturales y ambientales; Velar por que los cambios atmosféricos reales y potenciales y sus consecuencias socioeconómicas y ecológicas se tomaran plenamente en cuenta al planificar y aplicar políticas y programas relativos a las prácticas de utilización de los recursos terrestres y marinos y de aprovechamiento de la tierra; los gobiernos al nivel que corresponda, con la cooperación de los órganos competentes de las Naciones Unidas y, según proceda, de organizaciones intergubernamentales y no gubernamentales, y el sector privado, deberían: Aplicar políticas y programas que desalienten las prácticas de aprovechamiento de la tierra inadecuadas y contaminantes y promuevan la utilización sostenible de los recursos terrestres y marinos, Examinar la posibilidad de promover la elaboración y uso de prácticas relativas a los recursos terrestres y marinos y al aprovechamiento de la tierra que ayuden a resistir mejor los cambios y fluctuaciones atmosféricos, Promover el aprovechamiento sostenible y la cooperación en la conservación y el perfeccionamiento, según proceda, de los sumideros y depósitos de gases de efecto invernadero, en particular de la biomasa, los bosques y los océanos, así como de otros ecosistemas terrestres, costeros y marinos.

En el capítulo 11 se planteó la necesidad de salvaguardar las funciones múltiples de los bosques y los terrenos forestales mediante un fortalecimiento institucional adecuado y apropiado; ampliar el alcance y la eficacia de las actividades relacionadas con la ordenación, la conservación y el desarrollo sostenible de los bosques y asegurar eficazmente el aprovechamiento y la producción sostenibles de los bienes y servicios forestales, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo; para el año 2000, se reforzaría la capacidad y competencia de las instituciones nacionales de manera que pudieran adquirir los conocimientos necesarios para proteger y conservar los bosques, así como ampliar su esfera de acción y, en consecuencia, aumentar la eficacia de los programas y las actividades relacionados con la ordenación y el desarrollo de los bosques; los gobiernos al nivel que correspondiera, con el apoyo de las organizaciones internacionales, regionales y subregionales competentes, deberían, en los casos necesarios, aumentar la capacidad institucional para promover las múltiples funciones de los bosques y la vegetación de todo tipo, así como de otras tierras conexas y de los recursos derivados de los bosques, para apoyar el desarrollo sostenible y la conservación del medio ambiente en

todos los sectores; examinar y, en caso necesario, revisar las medidas y los programas pertinentes a todos los tipos de bosques y de vegetación, así como a otras tierras conexas y recursos forestales, y relacionarlos con otras políticas o leyes sobre utilización y explotación de las tierras; promover una legislación adecuada y otras medidas para prevenir la utilización no controlada de la tierra con otros fines; Establecer, desarrollar y mantener un sistema eficaz de divulgación y educación del público sobre cuestiones forestales para mejorar el conocimiento, el aprecio y la ordenación de los bosques en lo que respecta a las múltiples funciones y valores de los árboles, los bosques y las tierras forestales; Los objetivos de esta área de programas serían los siguientes: a) mantener los bosques existentes mediante actividades de conservación y ordenación, y mantener y ampliar las superficies boscosas y arboladas, en zonas adecuadas de los países desarrollados y de los países en desarrollo, mediante la conservación de los bosques naturales, la protección, rehabilitación y regeneración de los bosques, la forestación, la reforestación y la plantación de árboles, con miras a mantener o restablecer el equilibrio ecológico y aumentar la contribución de los bosques al bienestar de la humanidad y la satisfacción de sus necesidades.

En el capítulo 13 se abordaba el desarrollo sostenible de los ecosistemas de montaña en el cual se tomo en cuenta la importancia que tienen estos ecosistemas para la obtención de bienes y servicios ambientales y el beneficio que tendría su conservación para los pobladores, la implementación de programas de manejo de los recursos forestales, de suelos, etc.

La Conferencia de las Naciones Unidas para el Cambio Climático en Durban, Sud-África, fue sostenida del 28 de noviembre al 11 de diciembre de 2011. Esta conferencia involucró una serie de eventos, incluyendo la diecisieteava sesión de la Conferencia de las Partes (COP 17) para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) y la Conferencia de las Partes para el Protocolo de Kyoto (CMP 7). En apoyo a estos dos grandes temas, otros cuatro temas fueron tratados: la resumida sesión 14ava del grupo de trabajo Ad hoc, sobre la acción cooperativa a largo plazo bajo la Convención; y las 16ava sesión del grupo de trabajo Ad hoc sobre comités más lejanos para el Anexo I de las partes bajo el Protocolo de Kyoto; y las 35avas sesiones del cuerpo subsidiario para la implementación y el cuerpo subsidiario para el avance científico y tecnológico.

La conferencia tuvo 12,480 participantes, incluyendo más de 5,400 secretarías de estado, 5,800 representantes de los cuerpos y agencias de las Naciones Unidas, organizaciones intergubernamentales y organizaciones de la sociedad civil, y más de 1,200 miembros de los medios.

La reunión resultó en la adopción de 19 decisiones COP y 17 decisiones de CMP y la aprobación de un número de conclusiones por parte de los cuerpos subsidiarios. Estas salidas cubrieron un rango amplio de temas, notablemente el establecimiento del segundo periodo de comité bajo el Protocolo de Kyoto, una decisión sobre la acción cooperativa a largo plazo bajo la convención, el logro de un nuevo proceso hacia una salida acordada con fuerza legal aplicable a todas las partes de la Convención, y la operacionalización de la Fundación Clima Verde.

Después de la frustración de la conferencia de Copenhague y el intento de rescate del régimen climático multilateral en Cancún, negociadores en Durban tomaron no solo una esquina sino que resucitaron el Protocolo de Kyoto pero, para hacerlo, adoptó una decisión que nos llevará a negociaciones sobre un régimen climático del siglo 21 incluyente. Hubo un sentido fuerte que los elementos del paquete Durban, guiado por la necesidad de cubrir los comités que volverán al mapa del camino a Bali, restaurando suficientemente para un nuevo proceso de negociación, uno que continuará de atestiguar.

En la Cumbre de Río +20 (realizada el pasado Junio, se abordaron temas relacionados con la economía y el crecimiento verde, las poblaciones vulnerables, y la protección social como áreas claves de trabajo; por otro lado se puntualizó la necesidad de servicios políticos integrados para poder lograr el desarrollo de soluciones comprensivas. Se habla acerca del papel tan importante que tiene la educación en todo esto, así como de la importancia del turismo y la movilidad global para el desarrollo, el papel de la urbanización para el desarrollo sostenible resaltando el papel de la planeación y el diseño urbanístico. La llegada de la Conferencia de Río + 20 (UNEP, 2011) presenta una oportunidad a nivel global para tratar uno de sus propios objetivos establecidos: evaluar el progreso y las soluciones en la implementación de las metas como parte de acciones de transformación aceleradas y crecientes, programas y políticas. Nos movemos hacia la Conferencia de Río + 20 en un mundo cada vez más globalizado e integrado, la necesidad de enmarcar un progreso contra una economía global verde y gobiernos internacionales más eficaces y eficientes se vuelve un asunto vital. Sin objetos cuantitativos, nuestras metas medioambientales no pueden volverse una realidad teórica. Los objetivos relacionados al tiempo tienen cierta ayuda en el progreso realizado en contra de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, por ejemplo, y también deberían ser aplicados contra nuestros objetivos medioambientales.

La peculiaridad que Latinoamérica tiene con respecto a los otros países es que se trata de una región muy rica en cuestiones de ecosistemas, biodiversidad tanto en flora como en fauna, aunado a los acuerdos que se han firmado con respecto a la implementación de programas para apoyar el desarrollo económico, social, ambiental, etc. y el apoyo para con los países en vías de desarrollo son cuestiones que a nivel mundial están siendo apreciadas, la aportación que puede hacer México y en general esta región geográfica al mundo con respecto a la mitigación de efectos son muy importantes, por ejemplo tan sólo en cuestión de secuestro de carbono Latinoamérica tiene un potencial increíble para ello debido al tipo de ecosistemas forestales que existen, algunos que se encuentran bastante conservados y otros que cuentan con características especiales. La realización de investigación sobre esa línea y su posterior aterrizaje en el establecimiento de programas de secuestro de carbono son una rica y muy potencial fuente de apoyos económicos, mejoras sociales, políticas, ambientales, de salud, entre otras para las regiones involucradas que son regiones rurales con condiciones de vida baja. He ahí la importancia de estos proyectos y de la inversión en tiempo, esfuerzo, dinero y dedicación ya que mucha gente se vería beneficiada de ellos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

III.1 Introducción

El modelo empleado es el Modelo Presión-Estado-Respuesta (PER), que es una estructura o marco metodológico específico, desarrollado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), siendo el más aceptado a nivel mundial por su simpleza, facilidad de uso y posibilidad de aplicación a diferentes niveles, escalas y actividades humanas.

Recientemente, el modelo PER fue empleado en México a fin de establecer indicadores del desarrollo sustentable (INEGI-INE, 2000). Se basa en el hecho de que las actividades humanas ejercen Presión (P) sobre el ambiente, modificando con ello la cantidad y calidad, esto es, el Estado (E) de los recursos naturales, por lo que la sociedad Responde (R) a tales transformaciones con políticas generales y sectoriales, tanto ambientales como socioeconómicas, las cuales afectan y se retroalimentan de las presiones de las actividades humanas.

De forma esquemática la estructura de dicho modelo se presenta en la Fig. 2. En la parte inferior se aplica esta metodología, identificándose cada uno de sus elementos.

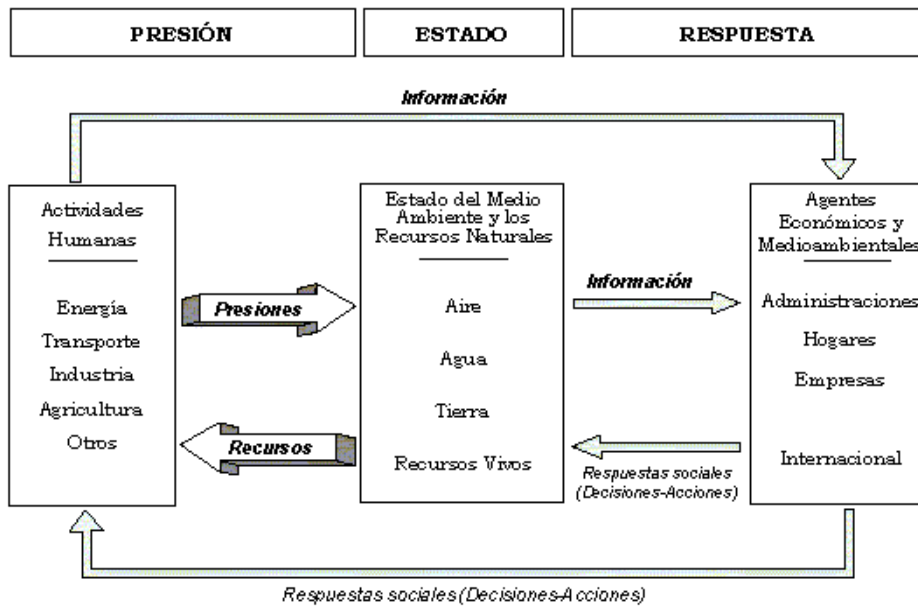


Fig. 2. Estructura del Modelo Presión-Estado-Respuesta. (OECD, 1993)

Cuadro 1. Modelo PER aplicado al proyecto

Componentes del Modelo	Componente aplicada al problema de investigación
Presión	Actividades que modifican el almacenamiento de carbono en suelo: Deforestación, Cambio de uso de suelo, etc.
Estado	Evaluación del contenido de carbono actual del suelo
Respuesta	Programas sectoriales sobre gestión y venta de servicios ambientales (bonos verdes de carbono)

De la aplicación del modelo anterior (Cuadro 1), es importante señalar que de las componentes mostradas, la única que se aborda en esta tesis es la referente al Estado del sistema, esto es a la evaluación del contenido de carbono en los suelos.

Con referencia a lo anteriormente planteado, para el conocimiento del Estado del almacenamiento del carbono en suelos, se tiene contemplada la siguiente metodología:

El diseño de la metodología que se emplea en este proyecto se encuentra dividida en tres etapas: trabajo de gabinete (fotografía aérea, imágenes de satélite, zonificación de la región de estudio, diseño muestral), trabajo de campo y evaluación en laboratorio, y la última es la de análisis de la información por medio de métodos estadísticos (estadística clásica y geoestadística).

El método empleado es analítico y comparativo, ya que se determinan propiedades físicas y químicas del suelo en laboratorio, con base en la norma NOM-021-SEMARNAT-2000, y se procede a comparar estos resultados con la información que se tiene de la zona, referente a estudios sobre temáticas diferentes, donde se observaron las mismas propiedades hace 20 años.

Una vez en el laboratorio se hace la preparación de las muestras de suelo mediante el secado y tamizado, para el posterior análisis de sus propiedades físicas y químicas, como son: Acidez hidrolítica (pH relación agua/suelo 2/1) y Acidez intercambiable (pH en solución de KCl relación solución/suelo 2/1) (McLean, 1982), Densidad Aparente, % Carbono Orgánico (Aguilar, 1988), % Nitrógeno Total (Etchevers, 1987), y Carbonatos y Bicarbonatos (Sáenz Peña *et al.*, 2005). Igualmente se preparan las muestras de hojarasca con un secado y molienda para posteriormente analizar: % Carbono Orgánico (Dean, 1974), % Nitrógeno Total (Etchevers, 1987).

Con la información generada de los análisis de laboratorio, se procederá a hacer análisis en base a Modelos estadísticos como son: técnicas descriptivas, técnicas comparativas y técnicas de relación y clasificación; de igual forma se hará uso de Modelos de Estadística Espacial como son: variogramas (Clark, 2001; Clark y Haper, 2008), el Kriging (Stein, 1999; Clark, 2001); y se utilizarán también los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el manejo de los datos (Ponce, 2004).

Se señala una vez más que de las componentes del Modelo PER aplicado para el problema del secuestro de carbono, en esta tesis sólo se aborda la correspondiente al Estado del sistema, planteándose la metodología pertinente a lo largo de este trabajo.

III.2 Trabajo de gabinete

Esta etapa del trabajo consistió en la recopilación de información sobre suelos forestales, secuestro de carbono en suelos, variabilidad espacial y temporal; también se compilaron datos de la Región Terrestre Prioritaria 105, y de los bosques templados y mesófilos de montaña que allí se encuentran. Por lo que a continuación se profundiza en la técnica.

III.2.1 Balance hídrico

La profundización en algunos de los aspectos que describen a la Caldera de Teziutlán fue necesario para la consecución de los objetivos planteados. Uno de ellos es el balance hídrico, del cual se habla a continuación.

Una de las aplicaciones de realizar un balance hídrico, es la planeación y posterior implementación de un programa de manejo sustentable de los acuíferos subterráneos.

Existen diferentes métodos, los cuales son usados para obtener un balance hídrico, entre los más conocidos se encuentran el de Thornthwaite y Mather (1957), la ecuación de Penman – Monteith y el método de Thornthwaite modificado por Scozzafava y Tallini (2001).

De acuerdo con Hamid *et al.* (2008), la ecuación de Penman – Monteith es un método usado comúnmente para estimar la evapotranspiración de una cosecha, pero su aplicación requiere de muchos y muy diferentes datos meteorológicos, y el establecimiento de una estación meteorológica que genere los datos requeridos es caro.

Scozzafava y Tallini (2001) modificaron el método original de Thornthwaite y Mather, mediante lo cual pudieron determinar la contribución de la infiltración neta en el balance hídrico estándar. El método de Thornthwaite es un método más simple para la estimación de la evapotranspiración siendo un método basado en el conocimiento de la temperatura, y para el cual el excedente de agua, se refiere a todo el exceso de agua que sale del suelo sin discriminar la infiltración neta de la escorrentía.

Los métodos de balance hídrico pueden aplicarse para estimar la infiltración neta en los sistemas subterráneos cuando los métodos directos, tales como la fluctuación del freático, las técnicas de trazadores etc. (Scanlon *et al.* 2002) no pueden aplicarse debido a que los datos requeridos no están siempre disponibles. La infiltración neta es la cantidad de agua que percola a través de una zona insaturada contra el nivel freático, después se le restan tanto las porciones de agua que están sujetas a escorrentía, evapotranspiración y almacenamiento en el suelo. Donde la cantidad total de infiltración neta corresponde aproximadamente a la recarga directa del acuífero.

Otra aplicación de método de Thornthwaite mostrada por Mohseni y Stefan (2001) son las proyecciones hechas en corrientes de cuencas hidrológicas, donde han sido usados una variedad de modelos para hacer dichas proyecciones en cuencas bajo diferentes escenarios climáticos. Algunos modelos proyectaron los cambios en las corrientes hídricas basados en perturbaciones en parámetros climáticos como temperatura, precipitación o evapotranspiración, mientras que otros usaron las proyecciones climáticas de los Modelos de Circulación General como información de entrada para alimentar dichos sistemas.

Un método complementario al método de Thornthwaite es el llamado método del número de curva (USDA Soil Conservation Service, 1986), dicha complementación hace posible la estimación del la escorrentía y entonces, mediante la diferencia entre el excedente y la escorrentía, se calcula la infiltración neta. El único inconveniente del método de número de curva es que debe aplicarse con registros de precipitación diaria, y se requiere la siguiente información adicional: (a) número de eventos de lluvia por mes, y (b) cantidad de lluvia para cada evento.

Como menciona Zimmermann (2006), el balance hídrico de Thornthwaite y Mather, es una herramienta simple y de aplicación frecuente para estimar excedentes de agua que no se almacenan en el perfil del suelo y requiere solamente datos de temperatura y precipitación media mensual.

Entre los métodos para conocer el balance hídrico, el de Thornthwaite (Scozzafava y Tallini, 2001) es uno de los más adecuados para cómputo detallado del balance hídrico mensual y anual. En la ecuación de balance, el método de Thornthwaite es usado para evaluar la evapotranspiración actual y la potencial.

La evapotranspiración potencial (PE en mm) se define como el valor máximo que se obtiene de la evapotranspiración en condición de suelo húmedo. Esta, se relaciona con la temperatura (t) de la manera siguiente (Thornthwaite y Mather, 1957):

$$PE = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (1)$$

donde t es la temperatura media mensual (°C); I es el índice térmico anual, el cual es:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

donde i_j es el índice térmico mensual de un mes j;

$$i_j = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

y el exponente a en la ecuación (1) es dada por:

$$a = (675^* \times 10^{-9})I^3 - (771^* \times 10^{-7})I^2 + (1.792^* \times 10^{-5})I + 0.4924$$

La evapotranspiración actual (AE) se evalúa en tres diferentes casos, como se describe un poco más abajo. En las siguientes ecuaciones, i es el mes actual, e $(i-1)$ es el mes anterior. El almacenamiento de agua máximo en el suelo (ST) es el agua en el suelo obtenida por extracción higroscópica y agua gravitacional. ST se encuentra ligada a los fenómenos de capilaridad y peliculares. ST es una constante para cada suelo y es una función de las propiedades del suelo (principalmente la textura, estructura, mineralogía de los granos del suelo, etc.). W_i es la cantidad de agua en el suelo para el mes actual (i), y P es la precipitación.

Caso 1

Cuando $P_i - EP_i \geq 0$, entonces:

$$AE_i = PE_i$$

y

$$W_i = W_{i-1} = ST$$

En este caso, la infiltración neta NI_i , está dada por:

$$SU_i = (NI_i + RO_i) = P_i - AE_i$$

Donde SU es el exceso total de agua en el suelo y RO es la escorrentía. En el método estándar de Thornwaite, el cual es usado por agrónomos, SU se introduce sin distinción alguna entre RO y NI.

Caso 2

Cuando $P_i - EP_i < 0$, entonces:

$$AE_i = \frac{W_i}{ST} EP_i$$

$$W_i = W_{i-1} + (P_i - AE_i)$$

(2)

$$W_i = \frac{ST}{ST + EP_i} (W_{i-1} + P_i)$$

$$AE_i = \frac{EP_i}{ST + EP_i} (W_{i-1} + P_i)$$

En este caso, SU es igual a cero.

Caso 3a

Cuando $P_i - EP_i \geq 0$ y $W_i < ST$, ecuación (2) es válida aún y SU es igual a cero. Sin embargo, si usamos la ecuación (2), entonces $W_i > ST$, y esta es una condición que no sucede en la naturaleza, de modo que es necesario imponer el Caso 3b.

Caso 3b

$$W_i = ST$$

y

$$AE_i = PE_i$$

y también

$$SU = P_i - AE_i > 0$$

III.2.2 Regímenes de Humedad del Suelo

De acuerdo con la Soil Survey Staff (1999), el intento de definir la sección control de régimen de humedad es para facilitar la estimación de los regímenes de humedad del suelo a partir de datos climáticos. El límite superior de esta sección control es la profundidad a la que está seco el suelo, (tensión superior a 1500 kPa, pero no así la atmósfera de aire) está húmeda por 2.5 cm de agua caída dentro de 24 hr. El límite superior es la profundidad a la que el suelo seco será humedecido por 7.5 cm de agua caída durante un periodo de 48 hrs.

Considerando también que, el término de régimen de humedad del suelo se refiere a la presencia o ausencia de agua tanto subterránea como aquella mantenida a una tensión menor de 1500 kPa en el suelo o en horizontes específicos durante periodos del año. El agua que permanece retenida a una tensión de 1500 kPa o mayor, no está disponible para mantener vivas a la mayoría de las plantas mesofíticas. Consecuentemente, un horizonte es considerado como seco cuando la tensión de humedad esta en 1500 kPa o más y se considera como húmedo si el agua se mantiene a una tensión menor de 1500 kPa pero mayor que cero.

Según lo reportado en la Soil Survey Staff (1999), el régimen de humedad del un suelo es tanto una propiedad importante del suelo, como un determinante de los procesos que pueden ocurrir en el mismo. Durante tiempos geológicos han existido cambios importantes en el clima. Los suelos que podrían haberse formado solo en un clima húmedo, ahora son preservados en un clima árido en algunas áreas. Tales suelos tienen características relictas que reflejan el régimen de humedad formador y otras características que reflejan el régimen de humedad actual.

El régimen de humedad del suelo sólo es una función parcial del clima. Mientras más profundo, los suelos permeables bajo condiciones de lluvias intensas y bien distribuidas tienen agua que está disponible para las plantas la mayor parte del tiempo. Los suelos en áreas de clima árido, sin embargo, no están necesariamente secos. Ellos podrían estar secos,

húmedos o saturados de agua, dependiendo de su posición en el paisaje, debido a que ellos podrían recibir agua de fuentes tales como la lluvia que cae sobre ellos.

Cada uno de los regímenes de humedad en la historia de un suelo es un factor en la génesis de ese suelo y es la causa de muchas características adicionales. La mayoría de estas características adicionales, sin embargo, y aquellas más importantes para las interpretaciones están relacionadas con el régimen de humedad actual, incluso cuando el régimen actual difiere ampliamente de algunos de los regímenes más recientes.

El clima actual determina el uso y manejo del suelo y es una propiedad del suelo. Además, los regímenes de humedad de la mayoría de los suelos son inferidos del clima actual, y mapas de pequeña escala pueden ser interpretados en términos de las características adicionales que son comunes a la mayoría de los suelos que tienen un clima común. Estas características incluyen la cantidad, naturaleza y distribución de la materia orgánica, el estado base del suelo y la ausencia o presencia de sales.

III.2.3 Regímenes de Temperatura del Suelo

La temperatura de un suelo es una de sus propiedades más importantes. Dentro de los límites, la temperatura controla las posibilidades de crecimiento de la planta y la formación del suelo. Por debajo del punto de congelamiento, no hay actividad biológica, el agua no se mueve más como un líquido, y a menos que haya heladas el tiempo se detiene para el suelo.

Entre temperaturas de 0 y 5°C, es imposible el crecimiento de la mayoría de las raíces de las especies de plantas y la germinación de la mayoría de las semillas. Un horizonte con 5°C es un tazón térmico para las raíces de las plantas.

Los procesos biológicos en el suelo son controlados en mayor medida por la temperatura y humedad del suelo. Cada planta tiene sus propios requerimientos térmicos. En el Antártico, por ejemplo, hay plantas microscópicas que crecen sólo a temperaturas por debajo de 7°C, a las cuales la mayoría de las plantas están inactivas. En el otro extremo, la germinación de las semillas de muchas plantas tropicales requieren temperaturas del suelo de 24°C o mayores. Las plantas tienen uno o más requerimientos térmicos en el suelo que se cumplen por los suelos de sus ambientes nativos. De manera similar, la fauna del suelo tiene requerimientos térmicos para su supervivencia. La temperatura del suelo, tiene además una influencia muy importante sobre los procesos físicos, químicos y biológicos en el suelo y sobre la adaptación de las especies introducidas.

En cualquier momento la temperatura dentro del suelo varía de un horizonte a otro. La temperatura cerca de la superficie varía con las horas del día y con las estaciones del año. Las variaciones pueden ser pequeñas o muy grandes, dependiendo del medio ambiente. Debido a que la temperatura es muy variable o tal vez debido a que no hay muestras conservadas, algunos edafólogos han pensado que no es una propiedad de un suelo. Unos se inclinan a notar que las propiedades difieren entre los suelos y en enfocar su atención sobre ellas.

Cada pedon tiene un régimen de temperatura característico que puede ser medido y descrito. Con propósitos prácticos, el régimen de temperatura puede ser descrito por la temperatura media anual del suelo, las variaciones medias estacionales de cada media, y la media cálida o gélida estacional del gradiente de temperatura del suelo medio dentro de la principal zona de raíces, la cual es la zona de una profundidad de 5 a 100cm.

III.2.3.1 Tipos de Regímenes de Temperatura del Suelo

A continuación se describe de los regímenes de temperatura del suelo que se usan para definir clases a varios niveles categóricos en la Soil Taxonomy (1999).

Crylico (Gr. Kryos, frío; significa suelos muy fríos): Los suelos en este régimen tienen una temperatura media anual menor de 8 °C, pero no tienen permafrost.

1. En suelos minerales, la temperatura media del suelo en verano (Junio, Julio y Agosto en el Hemisferio Norte y Diciembre, Enero y Febrero en el Hemisferio Sur) a 50 cm de profundidad o en un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que sea más superficial, es como sigue:

- a. Si el suelo no está saturado con agua durante alguna parte del verano y
 - (1) No tiene horizonte O, menor de 15 °C; o
 - (2) Tiene horizonte O, menor de 8 °C; o
- b. Si el suelo está saturado con agua durante alguna parte del verano y
 - (1) No tiene horizonte O, menor de 13 °C;
 - (2) Tiene un horizonte O ó un epipedón hístico, menor de 6 °C.

2. En suelos orgánicos, la temperatura media anual del suelo es menor de 6 °C.

Los suelos crylicos que tienen un régimen de humedad ácuico comúnmente están mezclados por congelamiento.

Suelos isofrígidos pueden tener también un régimen de temperatura crylico. Unos pocos con materiales orgánicos en la parte superior son excepciones.

Los conceptos de los regímenes de temperatura del suelo que se describen a continuación se usan en las definiciones de clases de suelos en las categorías inferiores.

Frígido: Un suelo con régimen frígido es más cálido en verano que un suelo con régimen crylico, pero su temperatura media anual es menor de 8 °C y la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano y en invierno es mayor de 6 °C, a 50 cm de profundidad, o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, si está más superficial.

Mésico: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor de 8 °C, pero menor de 15 °C, y la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano y en invierno es mayor

de 6 °C, a 50 cm de profundidad o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que esté más superficial.

Térmico: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor a 15 °C pero menor de 22 °C y la diferencia entre la temperatura media del suelo del verano y del invierno es mayor de 6 °C, a 50 cm de profundidad o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que este más superficial.

Hipertérmico: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor de 22 °C y la diferencia entre la temperatura media del suelo del verano y del invierno es mayor de 6 °C a 50 cm de profundidad o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que esté más superficial.

Si el nombre de un régimen de temperatura del suelo tiene el prefijo iso, la temperatura media del verano y la media del invierno difieren en menos de 6°C a 50 cm de profundidad o hasta un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que esté más superficial.

Isofrígido: La temperatura media anual del suelo es menor de 8°C.

Isomésico: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor de 8°C, pero menor de 15°C.

Isotérmico: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor de 15°C, pero menor de 22°C.

Isohipertérmico: La temperatura media anual del suelo es 22°C o mayor.

III. 3 Diseño Experimental

III.3.1 Trabajo de campo

Este consiste en la selección de los sitios de muestreo, así como el muestreo de suelos y recolección de hojarasca. Para utilizar el diseño experimental de forma más efectiva, se recomienda determinar, en un muestreo preliminar, la escala de la variación espacial y sobre esta base diseñar un muestreo adaptativo.

III.3.2 Muestreo de suelo

Se delimitó la zona de estudio y se estableció el diseño experimental de acuerdo con un diseño de tipo adaptativo, propuesto por Thompson (1992), el cual es un nuevo diseño muestral en el cual las regiones muestrales o unidades son seleccionadas basándose en valores de las variables de interés observadas durante un muestreo exploratorio previo y donde se presentan identificaciones favorables, encontrándose un criterio especificado dentro de una región, que es posteriormente usado para futuras entradas.

Usando este diseño, se localizaron nuevamente los puntos de muestreo correspondientes a los 21 perfiles ya existentes en la zona, pero además se incluyeron dos puntos de muestreo más, debido a la singular formación de una notable capa endurecida de carbonatos de sodio y calcio en la Región de los Humeros en la zona limítrofe de los estados de Puebla y Veracruz. Dicha capa de carbonatos es de interés debido a la relevancia que ésta podría tener en el estudio del almacenamiento del carbono como parte del proceso edafológico de este elemento en la naturaleza.

Además, se incluyeron puntos de muestreo al norte, al sur, al este y al oeste del punto georeferenciado y reubicado, teniendo un total de cinco muestras por punto de muestreo.

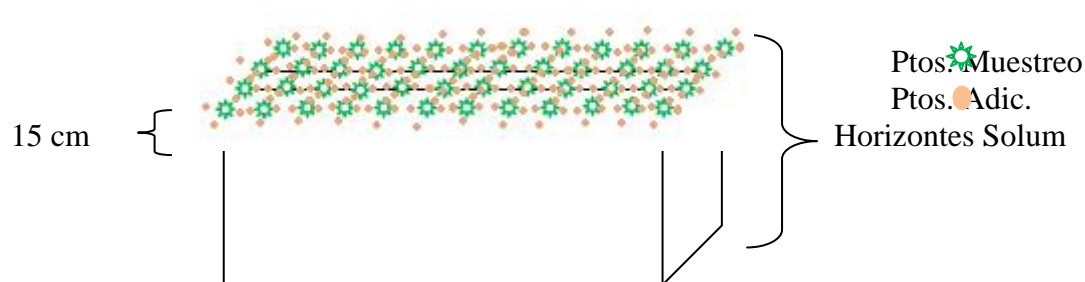


Fig. 3. Esquema de la distribución espacial de los puntos de muestreo definido

Se procedió a realizar la descripción *in situ* de las características morfológicas del Horizonte Orgánico de los perfiles, conforme a la metodología propuesta por Broll *et al.* (2006), lo que aportó información relevante del horizonte orgánico, como es:

- Las capas orgánicas: el tipo de capas orgánicas existentes, sus características, secuencia de aparición, propiedades y formas de humus, como se presenta la mezcla y unión de la materia orgánica con el material mineral,
- Las características biológicas: porcentaje de raíces,
- La influencia de lombrices
- Los macro - poros cuyo diámetro es mayor de 1 mm en el suelo mineral superficial,
- Los macro - poros continuos con diámetro mayor de 1 mm en la interfase suelo superficial – subsuelo.

Toda la información colectada en campo fue vaciada en bases de datos.

Por otro lado, se tomaron las muestras de los horizontes A y B del suelo, éstas se colocaron en bolsas de polietileno, se les asignó y rotuló adecuadamente su clave de identificación, así como su profundidad en centímetros y la fecha de su recolección, posteriormente fueron llevadas al laboratorio.

Se tomaron las muestras de hojarasca con un bastidor de aproximadamente 40 x 40 cm, dichas muestras se etiquetaron adecuadamente y fueron colocadas en bolsas de papel y se llevaron al laboratorio.

Finalmente se toman las muestras para la determinación de densidad aparente con los cilindros de aluminio, de dimensiones aproximadas de 7.7 cm de diámetro, 6 cm de alto. Las muestras se rotularon adecuadamente, se colocan en bolsas de polietileno y se llevan al laboratorio.

Una vez en laboratorio, las muestras fueron preparadas para los posteriores análisis, como se describe a continuación.

III. 4 Trabajo de laboratorio

III. 4.1 Preparación de las muestras de suelos para el análisis

➤ Secado

Las muestras se colocaron sobre papel periódico y se extendieron manualmente. Durante 2 a 3 días se dejaron secar a la sombra, a temperatura ambiente y en un lugar ventilado, sin corrientes de aire y exceso de humedad que pudiera causar algún tipo de contaminación a las muestras.

➤ Tamizado

Las muestras de suelo se tamizaron a través de una malla N°. 10 (apertura de malla 2 mm), con la finalidad de obtener uniformidad en el tamaño de partículas del suelo; se cuantificó la cantidad de piedras, raíces y hojas por cada 100 g de suelo y finalmente se almacenaron las muestras de suelo adecuadamente.

También se hizo la separación de las raíces gruesas, las cuales se colocaron en bolsas de polietileno y se etiquetaron adecuadamente.

III.4.2 Preparación de las muestras de hojarasca para el análisis

➤ Secado

Las muestras se secaron lo más pronto posible en una estufa a 60°C (a temperatura constante) durante 24 a 48 horas. Esto de acuerdo con los criterios manejados por Jones y Steyn (1973), según los cuales existen dos requerimientos que se deben satisfacer al secar el material vegetal, a saber: que la temperatura debe ser suficiente para destruir los componentes bioquímicos (enzimas), responsables de la descomposición, y que la temperatura sea óptima para remover la humedad, pero sin llegar a una descomposición térmica del material vegetal.

➤ Molienda

Este proceso se llevo a cabo para facilitar el manejo del material, además de homogeneizar su composición.

➤ Tamizado

Este proceso se realizó para homogeneizar la composición del material.

III.4.3 Determinación de las propiedades físicas y químicas en las muestras de suelo

➤ *pH (Relación 1:2)*

El pH de las muestras se determinó por el método potenciométrico tanto en agua como en solución de KCl 1N, en relación suelo/agua y suelo/solución de 1/2 (Goijberg y Aguilar, 1987; McLean, 1982).

➤ *Densidad aparente*

Se utilizó el método del cilindro. La determinación se realizó con ayuda de un anillo de acero de volumen conocido, el cual se enterró en el suelo y al sacarlo se buscó que el cilindro quedara lleno, de modo que el volumen del cilindro es el volumen del suelo. La muestra se seco por 24 horas en una estufa a una temperatura de 105°C. Se determinó su peso (hasta peso constante) y se reportó en unidades de g/cm^3 , esto es debido al cociente entre la masa seca del suelo (g) y el volumen conocido del cilindro (cm^3).

➤ *Porcentaje de materia orgánica. Por el Método de Walkley y Black*

La muestra de suelo se oxidó con dicromato de potasio, posteriormente se adiciono ácido sulfúrico y ácido fosfórico concentrado, se tituló con sulfato ferroso 1 N utilizando como indicador difenilamina (León y Aguilar, 1987; Aguilar, 1988).

➤ *Porcentaje de Nitrógeno total. Por el Método Semi-micro Kjeldahl*

Se colocó la muestra de suelo seco, molido y tamizado (malla 10), se le agregó la mezcla de catalizadores, H_2SO_4 concentrado y se colocó a calentar en la unidad digestora a temperatura media alta hasta que el digestado se tornara claro. Se dejó ebulir la muestra por espacio de 4 a 6 hrs a partir de este momento, regulando la temperatura para mantener los vapores de ácido sulfúrico condensados en el tercio inferior del cuello del tubo de digestión. Una vez completada esta etapa se dejó el frasco y agregó suficiente agua para colocar el digestado en suspensión, mediante agitación y se dejó decantar. Se procedió a destilar la solución digerida con agua destilada e NaOH - $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y se recibió el destilado en un matraz Erlenmeyer que contenía ácido bórico e indicadores. El destilado se valoro con H_2SO_4 0.01 N. (Etchevers, 1987).

➤ *Carbonatos y bicarbonatos disueltos. Por el Método Volumétrico*

Se diluyó la muestra de suelo con agua, una vez realizado esto se tomó una alícuota de la dilución y se diluyó nuevamente, se agregó fenolftaleína como indicador, se tituló con ácido clorhídrico 0.1 N para determinar carbonatos. A la muestra titulada anteriormente, se le agrega naranja de metilo como indicador y se tituló con ácido clorhídrico 0.1 N para determinar así los bicarbonatos presentes (Sáez Peña, 2005).

III.4.4 Determinaciones de las propiedades químicas en las muestras de hojarasca

➤ *pH (Relación 1:5)*

El pH de las muestras se determinó por el método potenciométrico en agua y en solución de KCl 1N, en relación hojarasca/agua y hojarasca/solución de 1:5 (Goijberg y Aguilar, 1987; McLean, 1982).

➤ *Porcentaje de materia orgánica. Por método de pérdida por ignición*

Esta técnica se denomina así ya que comprende la medición de la pérdida de peso de la muestra después de realizar una combustión seca del material orgánico (Fong Lee *et al.*, 1983). Se pesó la muestra de suelo en un crisol, registrándose el valor. Se introdujo la muestra en una mufla y se calcino la muestra a 600°C por dos horas. Una vez terminada la calcinación, se colocó el crisol con la muestra en un desecador para tomar la temperatura ambiente, una vez alcanzada esta temperatura se registró el peso nuevamente (http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/medio_mod1.2.htm).

El procedimiento analítico varía ampliamente con respecto a la temperatura y tiempo de combustión. Dean (1974) encontró que las pérdidas por ignición llevadas a 550°C proveen una medida del contenido del material orgánico con una precisión comparable a otros métodos como el analizador de carbono, el cual mide el carbono total como CO₂ por cromatografía de gases.

➤ *% Nitrógeno Total. Por el método Semimicro-Kjeldahl*

Se colocó la muestra seca, molida y tamizada (malla 40), se agregó la mezcla de catalizadores, H₂SO₄ concentrado y se pusieron a calentar en la unidad digestora a temperatura media alta hasta que el digestado se tornó claro. Se procedió a ebulir la muestra por espacio de 4 a 6 hrs a partir de este momento, regulando la temperatura para mantener los vapores de ácido sulfúrico condensados en el tercio inferior del cuello del tubo de digestión. Una vez completada esta etapa, se dejó el frasco y se agregó suficiente agua para colocar el digestado en suspensión, mediante agitación y se dejó decantar. Se destiló la solución digerida con agua destilada e NaOH - Na₂S₂O₃ y se recibió el destilado en un matraz Erlenmeyer que contenía ácido bórico e indicadores. El destilado se valoró con H₂SO₄ 0.01 N. (Etchevers, 1987).

A manera de resumen se brinda el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Relación de propiedades de laboratorio y su técnica de detección

Análisis	Técnica
% N Total	Método Semi-micro Kjeldahl
Densidad aparente	Método del Cilindro
% Materia Orgánica	Método Walkley y Black, Ignición
pH	Método del potenciómetro
Carbonatos y bicarbonatos	Método Volumétrico

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados producto de la tesis se presentan debajo. Como paso previo al análisis del COS en esta zona, se retomó la descripción de la zona de estudio y se introdujeron nuevos elementos que se incorporaron a la base de datos de 1987. A este respecto, lo realizado fue: digitalización de la información cartográfica, tanto de la denominada región RTP – 105 como de la zona de Teziutlán, referente a aguas superficiales, climas, isotermas, isoyetas, geología, vegetación, edafología, la localización de los municipios, la ubicación de los perfiles de suelo y puntos de muestreo hasta antes de la actualización del acervo de información. De igual forma se digitalizaron las diapositivas existentes de la zona de estudio.

Se enfatizó en el clima de la zona de estudio, el que se expone de manera detallada. Se elaboró la base de datos del 2009, lo que ha permitido exponer la exploración estadística realizada, la estimación del carbono orgánico en suelo en ambos períodos y las comparaciones en el espacio y en el tiempo a través de modelos estadísticos.

IV.1 Clima de la Zona de Estudio

Se presenta la descripción del clima de la zona de estudio, a través de la ubicación de las estaciones meteorológicas, el análisis de las series de tiempo de temperatura y precipitación de una de las estaciones, los climogramas y los mapas de isotermas e isoyetas.

IV.1.1 Ubicación de las Estaciones Meteorológicas

En la región de estudio (RTP – 105) se encuentran distribuidas un total de 32 estaciones termopluviométricas, a saber:

Tetelilla (CFE)	Ayotoxco (CFE)	Capuluaque (CFE)
Cuetzalan del Progreso	Huahuaxtla (CFE)	Jopala (CFE)
La Fundición Aire Libre (CFE)	La Pagoda (CFE)	Mapilco (CFE)
Oyameles	Paso del Jardín (CFE)*	Presa La Soledad
San Juan Acateno (CFE)	Teziutlán (DGE)	Teziutlán (SMN)
Tlatlauquitepec (CFE)	Zacapoaxtla (SMN)	Zacapoaxtla (DGE)
Zapotitlán de Méndez	El Rosario (CFE)*	Patla (CFE)
San José Acateno	Campo Exp. Teziutlán	Tepecapan (CFE)
Las Margaritas	Gómez Poniente (CFE)	Los Humeros (CFE)
Ayotoxco de Guerrer	Teziutlán (CFE)	Jalacingo
Cuauhtamingo (CFE)	Jalacingo (CFE)*	Acajete
Altotonga	Las Minas	Perote
Alchichica		

La información con la que se cuenta de estas estaciones es: su ubicación geográfica, temperatura y precipitación media mensual, de diversos años. Cabe mencionar que se descartaron de entrada las estaciones que se muestran de color rojo y con *, debido a la poca información con que se cuenta de ellas.

Estas estaciones se encuentran localizadas geográficamente de la siguiente manera:

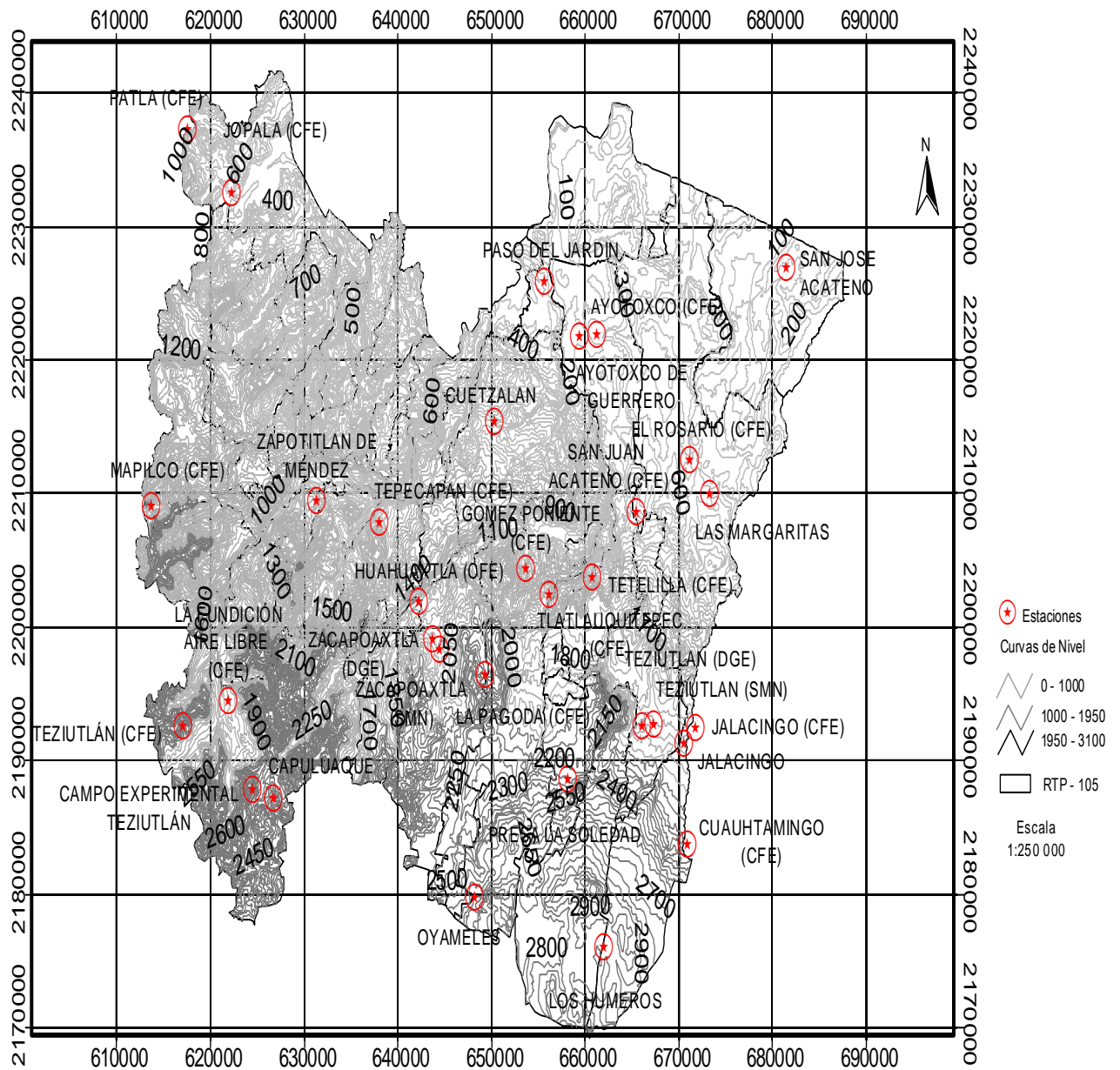


Fig. 4. Mapa de ubicación de estaciones termo-pluviométricas RTP – 105

Una vez realizado lo anterior, se procedió a clasificar la información existente en tres periodos de tiempo, siendo estos:

- 1960 – 1974
- 1975 – 1989
- 1990 – 2004

Se decidió que fueran periodos de quince años porque para que la información sea considerada como válida debe contarse con un mínimo de diez años ininterrumpidos de datos climáticos. Además de lo anterior, se quiere conocer el comportamiento climático de la región de estudio antes y después de los años de toma de muestras (1987), por lo que se decidió establecer un periodo arriba y otro abajo.

Una vez establecido el criterio de partida, se seleccionaron las estaciones que cumplieran con dichos requerimientos, esto es, que contaran con la información referente a temperatura y precipitación media anual de los tres periodos de tiempo. Se seleccionaron, finalmente, un total de: dos estaciones completas (1960 – 1974) y cuatro más con un año faltante (1961 – 1974) para el periodo A; ocho estaciones completas (1975 – 1989) para el periodo B; y para el periodo C, cinco estaciones completas (1990 – 2004), una con falta de datos de un año (1991 – 2004), otra estación con falta de un año de información (1990 – 2003), otra estación con falta de información de un año (1991-2004).

Las estaciones a las que se hace referencia arriba (de acuerdo a las características mencionadas respectivamente y en ese orden) son las siguientes:

- Huahuaxtla (CFE), Tlatlauquitepec (CFE), Jopala (CFE), Mapilco (CFE), Zapotitlán de Méndez y Jalacingo.
- Tetelilla (CFE), Huahuaxtla (CFE), Presa La Soledad, Teziutlán (SMN), Tlatlauquitepec (CFE), Zacapoaxtla (SMN), Zapotitlán de Méndez y Jalacingo.
- Oyameles, Teziutlán (SMN), Jalacingo, Acajete, Altotonga, Las Minas, Perote y Alchichica.

A continuación se muestra la ubicación de las estaciones sólo para los primeros periodos.

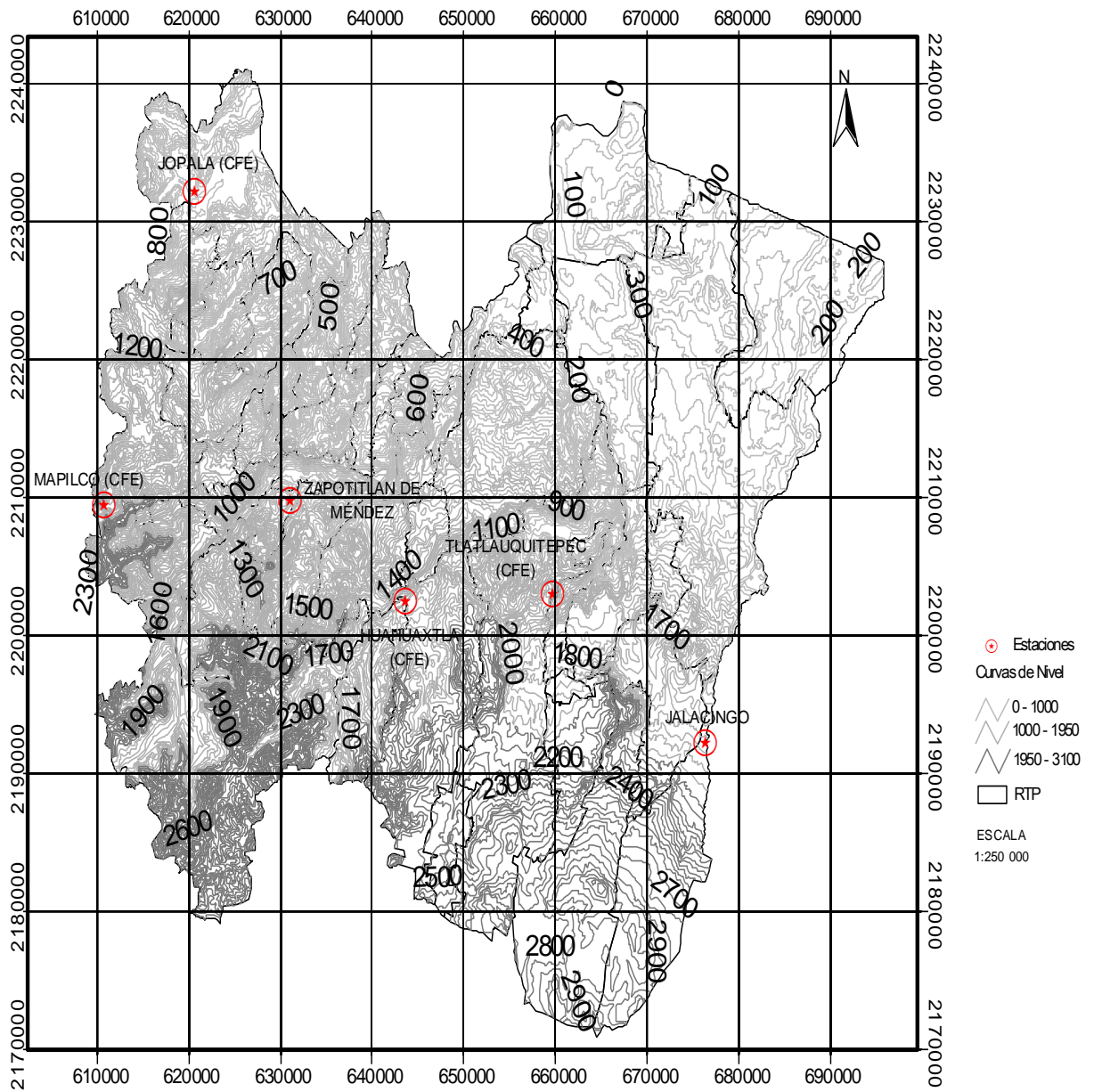


Fig. 5. Mapa de ubicación de las estaciones termo-pluviométricas correspondientes al periodo A

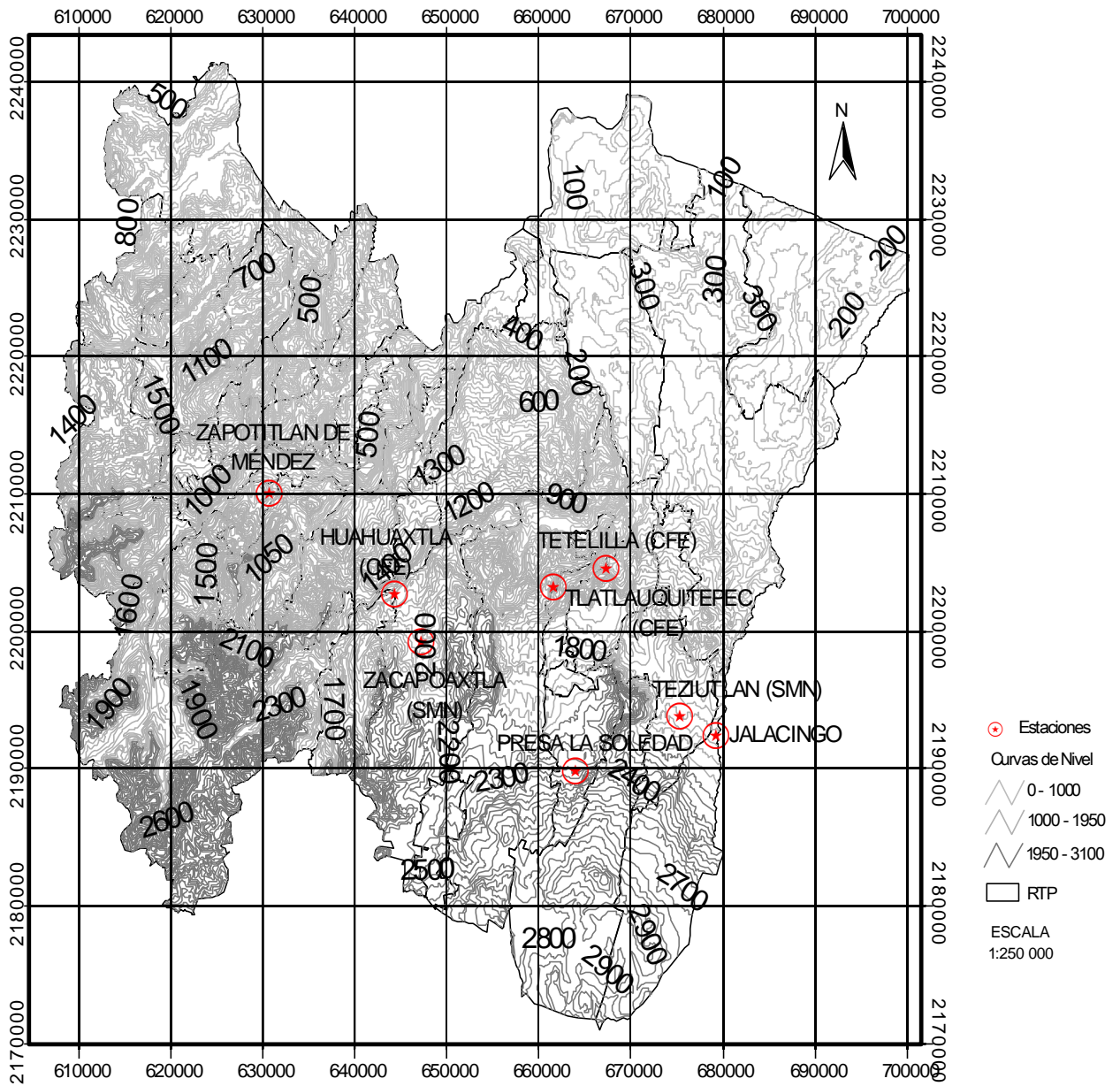


Fig. 6. Mapa de ubicación de las estaciones termo-pluviométricas correspondientes al periodo B

IV.1.2 Análisis de Series de Tiempo

De los datos de temperatura y precipitación obtenidos de las estaciones termoplumiométricas correspondientes a los periodos citados con anterioridad, se presenta solamente el análisis de las series de tiempo para la Estación de Jalacingo, con el objetivo de evidenciar las variaciones térmicas y pluviométricas a lo largo del tiempo.

Referente a los datos del periodo A, se observa que el comportamiento de las medias de la temperatura oscila alrededor de los 13°C a excepción del año 69, en el que se dispara la temperatura llegando a más de 14°C, como puede apreciarse en el Cuadro 3 y la Fig. 7; por otro lado, la Fig. 8 muestra un comportamiento estacionario en la serie de datos para ese mismo periodo.

Estación Jalacingo (Temperatura)

Cuadro 3. Medias Anuales de Temperatura Periodo A

Variable	Año	Media
Temperatura	1961	13.417
	1962	13.433
	1963	13.538
	1964	13.775
	1965	13.558
	1966	12.975
	1967	13.092
	1968	13.008
	1969	14.483
	1970	13.633
	1971	13.158
	1972	13.192
	1973	13.425

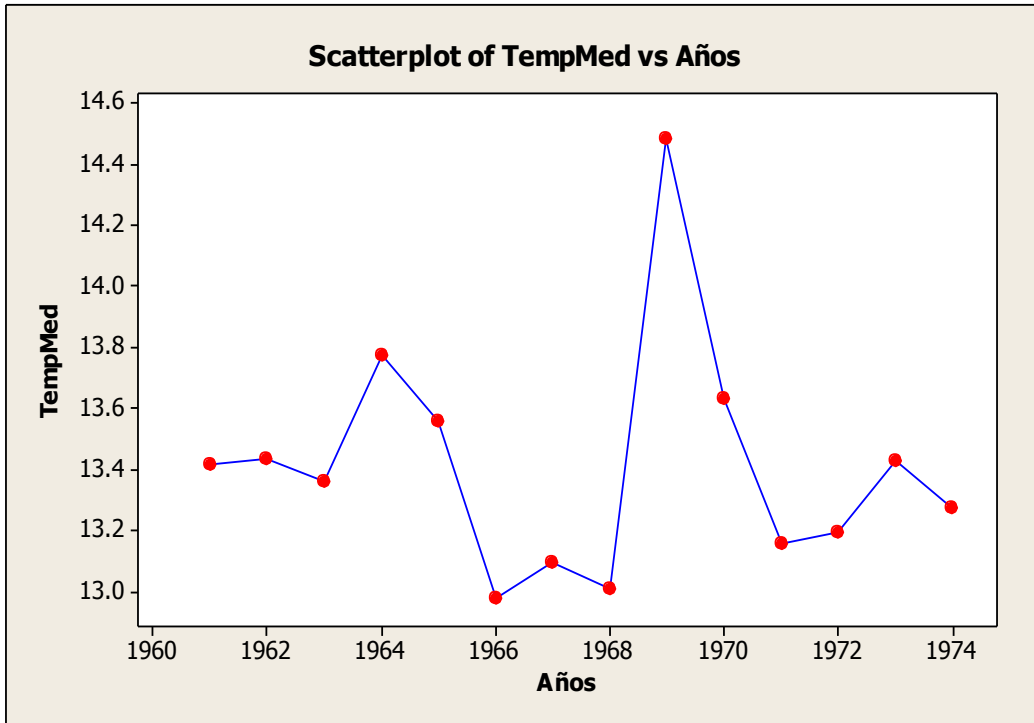


Fig. 7. Comportamiento de Temperatura vs Tiempo Periodo A

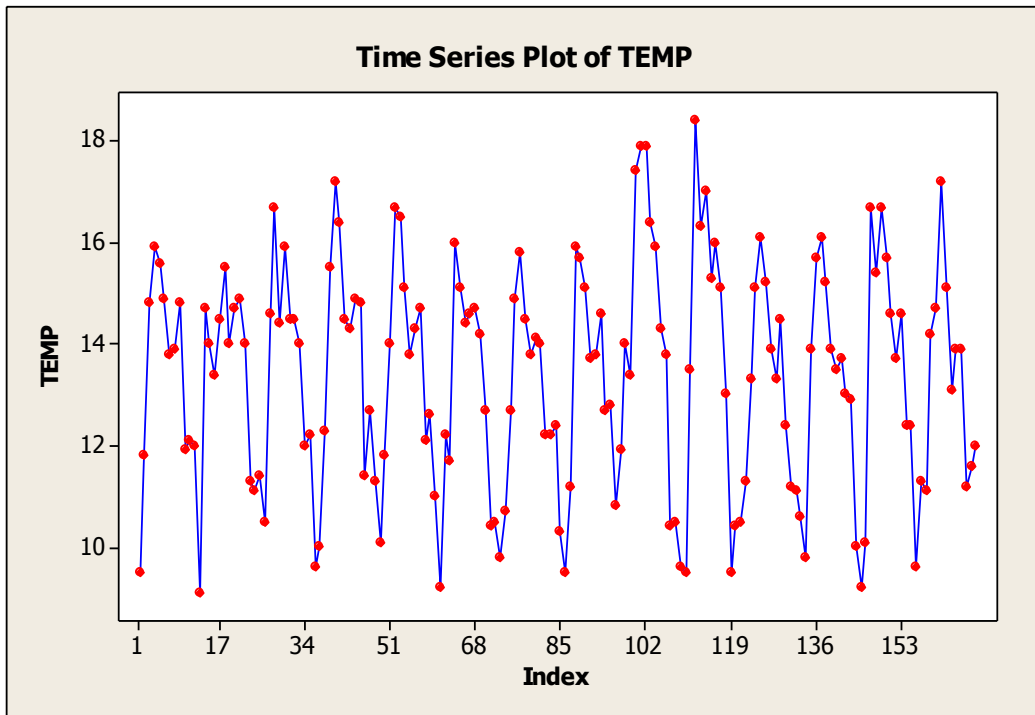


Fig. 8. Grafico de Serie de Tiempo de la Temperatura para el Periodo A

En el periodo B, el Cuadro 4 y la Fig. 9 muestran que a partir de 1981 la temperatura aumenta, y la serie de los datos de la Fig. 10 presenta una tendencia de incremento.

Cuadro 4. Medias Anuales de Temperatura Periodo B

Variable	Año	Media
Temperatura	1975	13.658
	1976	12.750
	1977	13.425
	1978	13.317
	1979	13.375
	1980	13.917
	1981	15.795
	1982	16.267
	1983	16.392
	1984	15.683
	1985	16.017
	1986	16.183
	1987	15.775
1988	15.683	
1989	15.683	

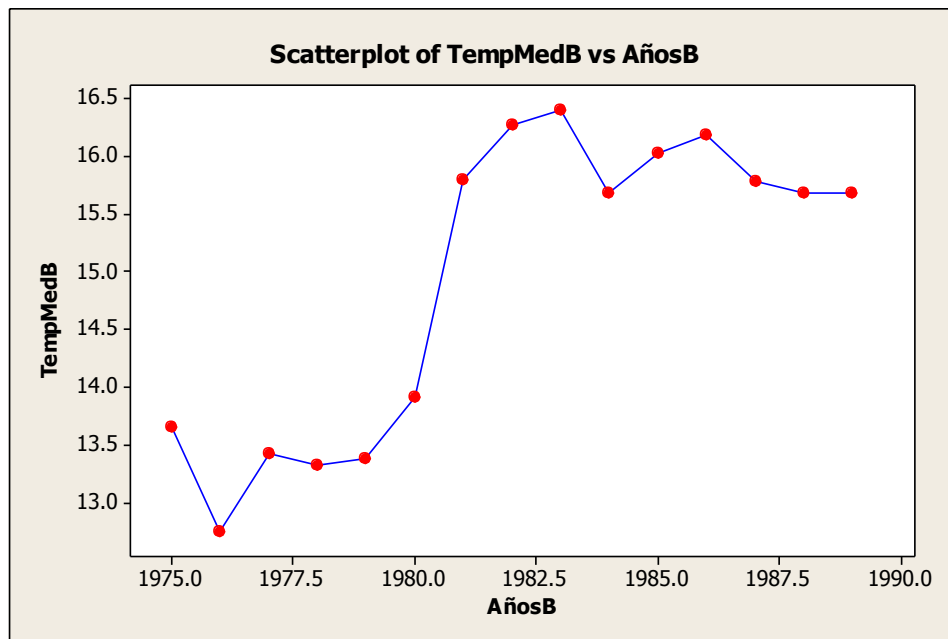


Fig. 9. Comportamiento de Temperatura vs Tiempo Periodo B

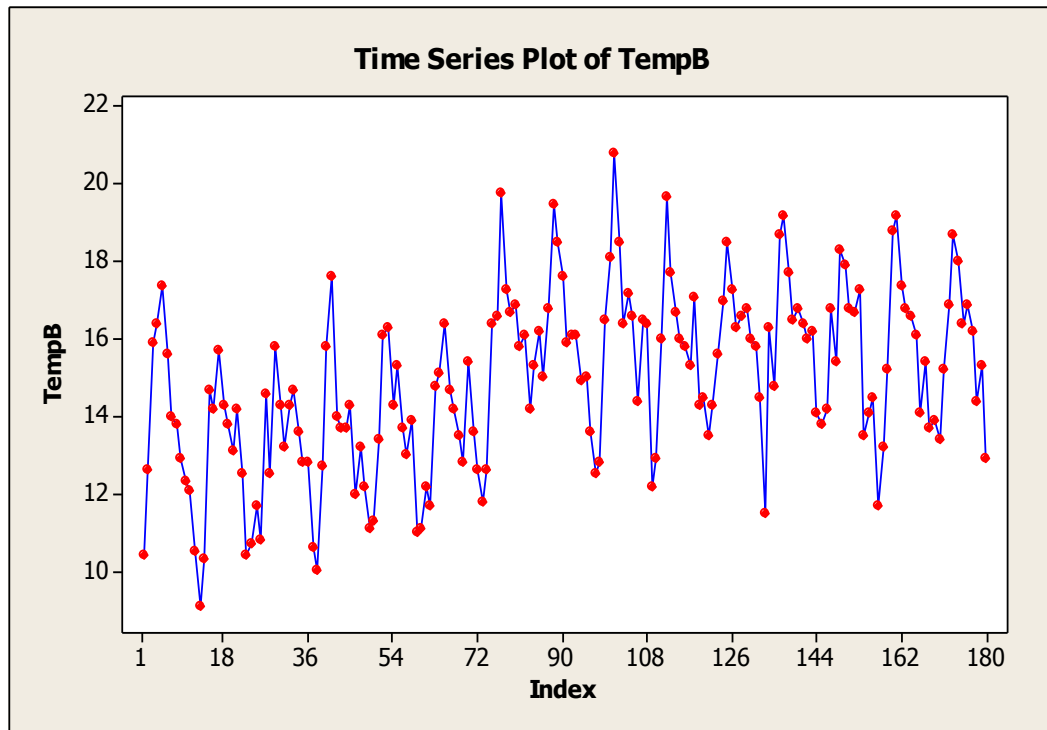


Fig. 10. Grafico de Serie de Tiempo de la Temperatura para el Periodo B

Por último, para el periodo C, como se muestra en el Cuadro 5 y la Fig. 11, a partir de 1999 la temperatura desciende, y en la Fig. 12 se muestra una tendencia ligeramente al decremento.

Cuadro 5. Medias Anuales de Temperatura Periodo C

Variable	Año	Media
Temperatura	1990	15.708
	1991	16.208
	1992	15.650
	1993	15.892
	1994	15.900
	1995	16.358
	1996	15.567
	1997	15.575
	1998	16.642
	1999	15.167
	2000	15.250
	2001	14.508
	2002	15.242
2003	14.783	

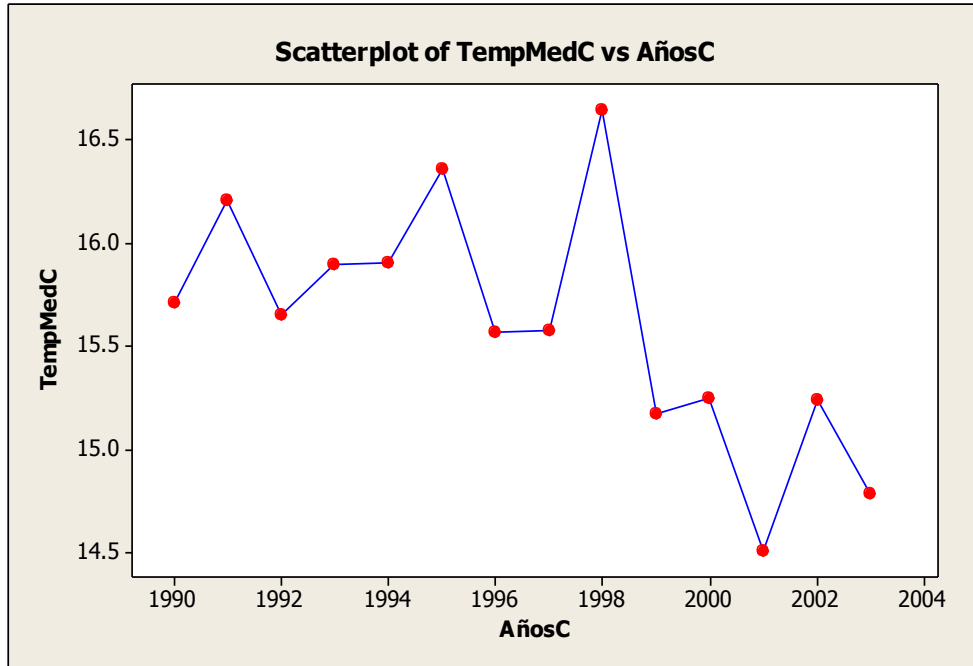


Fig. 11. Comportamiento de Temperatura vs Tiempo Periodo C

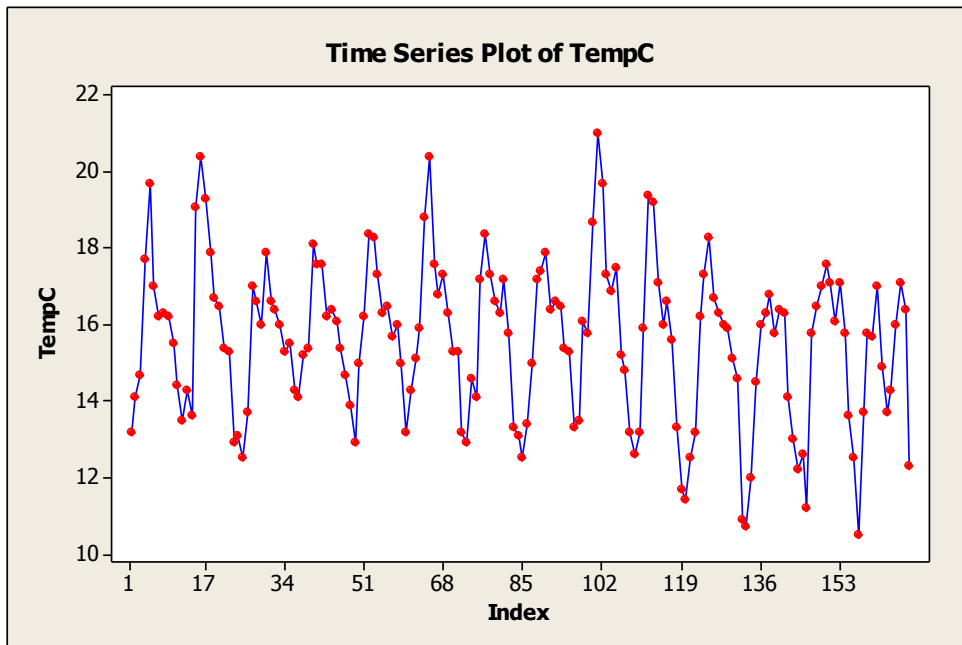


Fig. 12. Grafico de Serie de Tiempo de la Temperatura para el Periodo C

En cuanto a la precipitación, el Cuadro 6 y la Fig. 13 refieren un comportamiento similar al de la temperatura en ese mismo período, destacándose también que en 1969 se dispara la precipitación alcanzando una cifra por arriba de 190 mm anuales; así mismo en la Fig. 14 se muestra también un comportamiento estacionario de la serie de datos.

Estación Jalacingo (Precipitación)

Cuadro 6. Medias Anuales de Precipitación Periodo A

Variable	Año	Media
Precipitación	1961	150.0
	1962	109.7
	1963	104.4
	1964	137.9
	1965	121.2
	1966	154.3
	1967	136.4
	1968	149.5
	1969	190.7
	1970	128.8
	1971	145.2
	1972	181.4
	1973	140.9
	1974	173.3

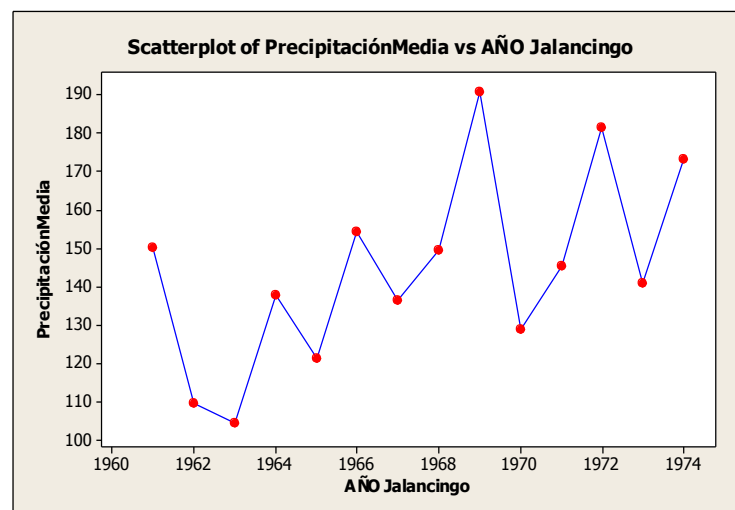


Fig. 13. Comportamiento de Precipitación vs Tiempo Periodo A

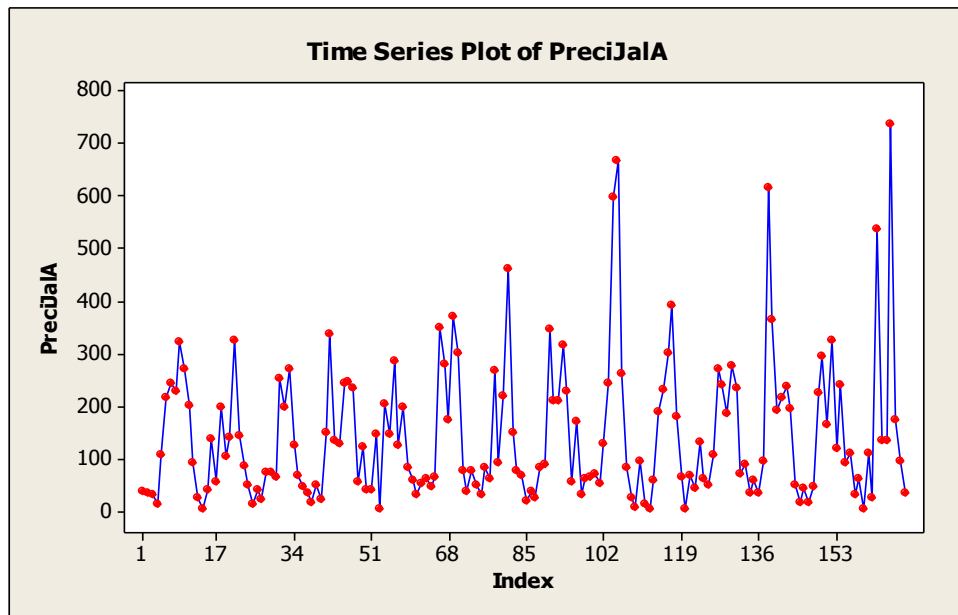


Fig. 14. Grafico de Serie de Tiempo de la Precipitación para el Periodo A

Con respecto a la precipitación del período B, puede destacarse en el Cuadro 7 y en la Fig. 15 que existe un pico en el año 1981, y el comportamiento de la serie dada en la Fig. 16 es estacionario.

Cuadro 7. Medias Anuales de Precipitación Periodo B

Variable	Año	Media
Precipitación	1975	139.4
	1976	157.6
	1977	113.7
	1978	170.0
	1979	169.1
	1980	85.7
	1981	199.4
	1982	133.5
	1983	110.7
	1984	167.8
	1985	143.0
	1986	111.8
	1987	109.3

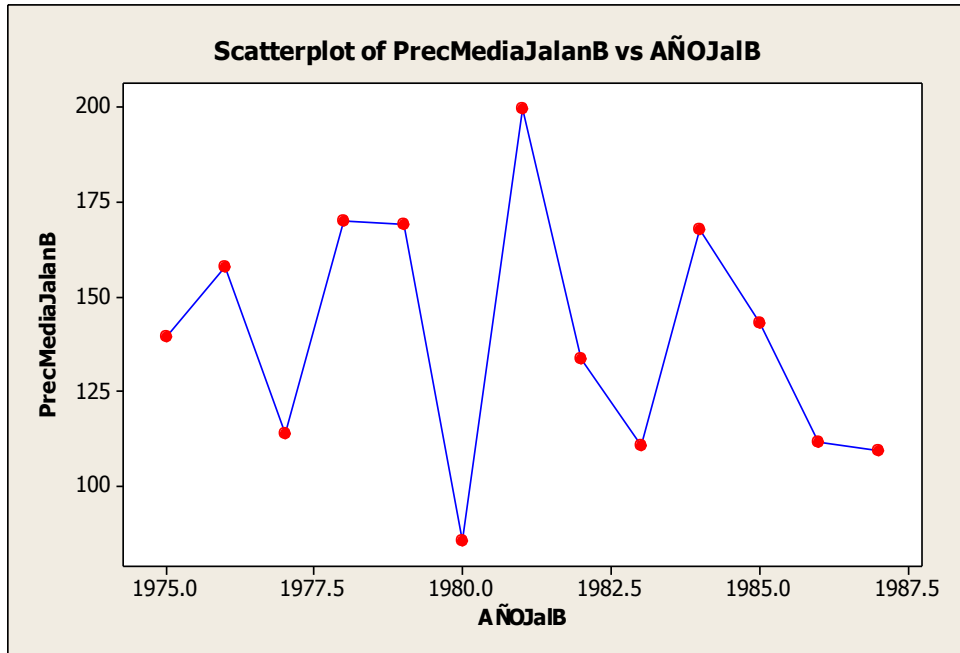


Fig. 15. Comportamiento de Precipitación vs Tiempo Periodo B

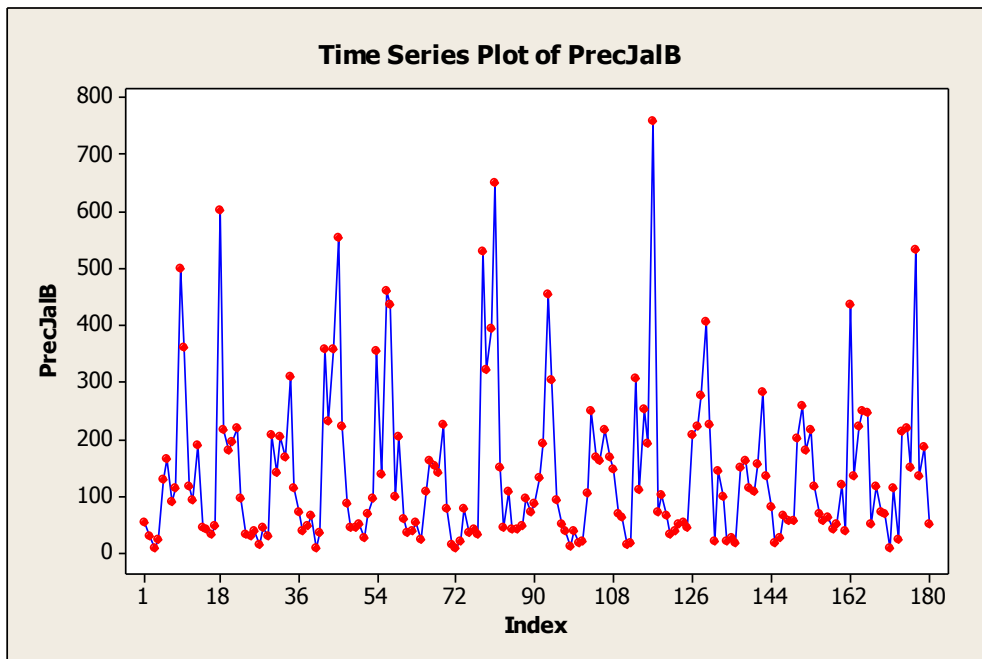


Fig. 16. Grafico de Serie de Tiempo de la Precipitación para el Periodo B

Finalmente, en cuanto a la precipitación del período C, el Cuadro 8 y la Fig. 17 muestran un pico en el año 1999, lo que también se aprecia en la Fig. 18 donde se tiene una serie estacionaria con un pico en ese mismo año.

Cuadro 8. Medias Anuales de Temperatura Periodo C

Variable	Año	Media
Precipitación	1990	156.1
	1991	140.5
	1992	165.3
	1993	122.2
	1994	106.1
	1995	163.5
	1996	138.1
	1997	144.3
	1998	138.2
	1999	236.8
	2000	145.0
	2001	146.1
	2002	118.4
2003	138.6	

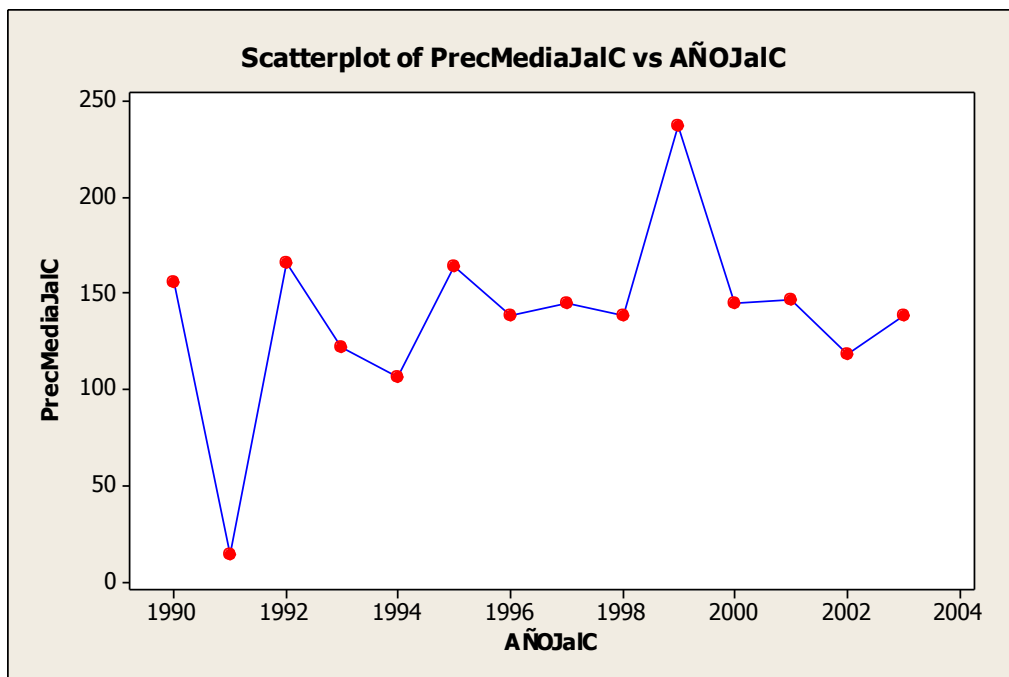


Fig. 17. Comportamiento de Precipitación vs Tiempo Periodo C

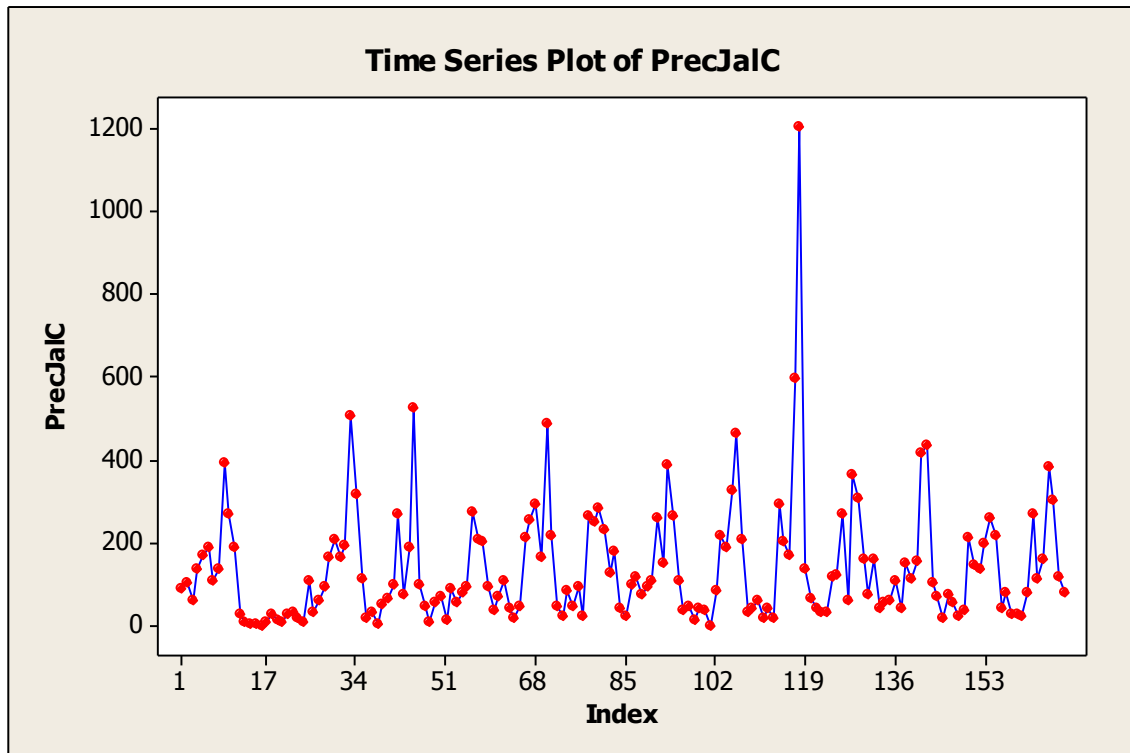


Fig. 18. Grafico de Serie de Tiempo de la Precipitación para el Periodo C

IV.1.3. Climogramas

Con las estaciones identificadas, se hallaron los datos faltantes (mediante un proceso estadístico), se organizó la información existente y se realizaron los climogramas correspondientes por periodos de cada una de las estaciones, teniendo en cuenta los datos tratados estadísticamente y los datos en bruto.

Posteriormente, se comparan estos climogramas, tanto con un proceso visual como con los datos en brutos, para observar si existe diferencia entre ellos. De las Figuras 19, 20 y 21, donde se muestran los climogramas para los periodos A, B y C respectivamente, salta a la vista que no existe diferencia entre los climogramas obtenidos.

Se ha aplicado el método de Thornthwaite para la obtención de los diagramas de regímenes de humedad existentes en la zona de estudio, puesto que éste tiene relación con el fenómeno del secuestro de carbono, ya que los parámetros climáticos son factores de suma importancia en la dinámica de descomposición de la materia orgánica del suelo.

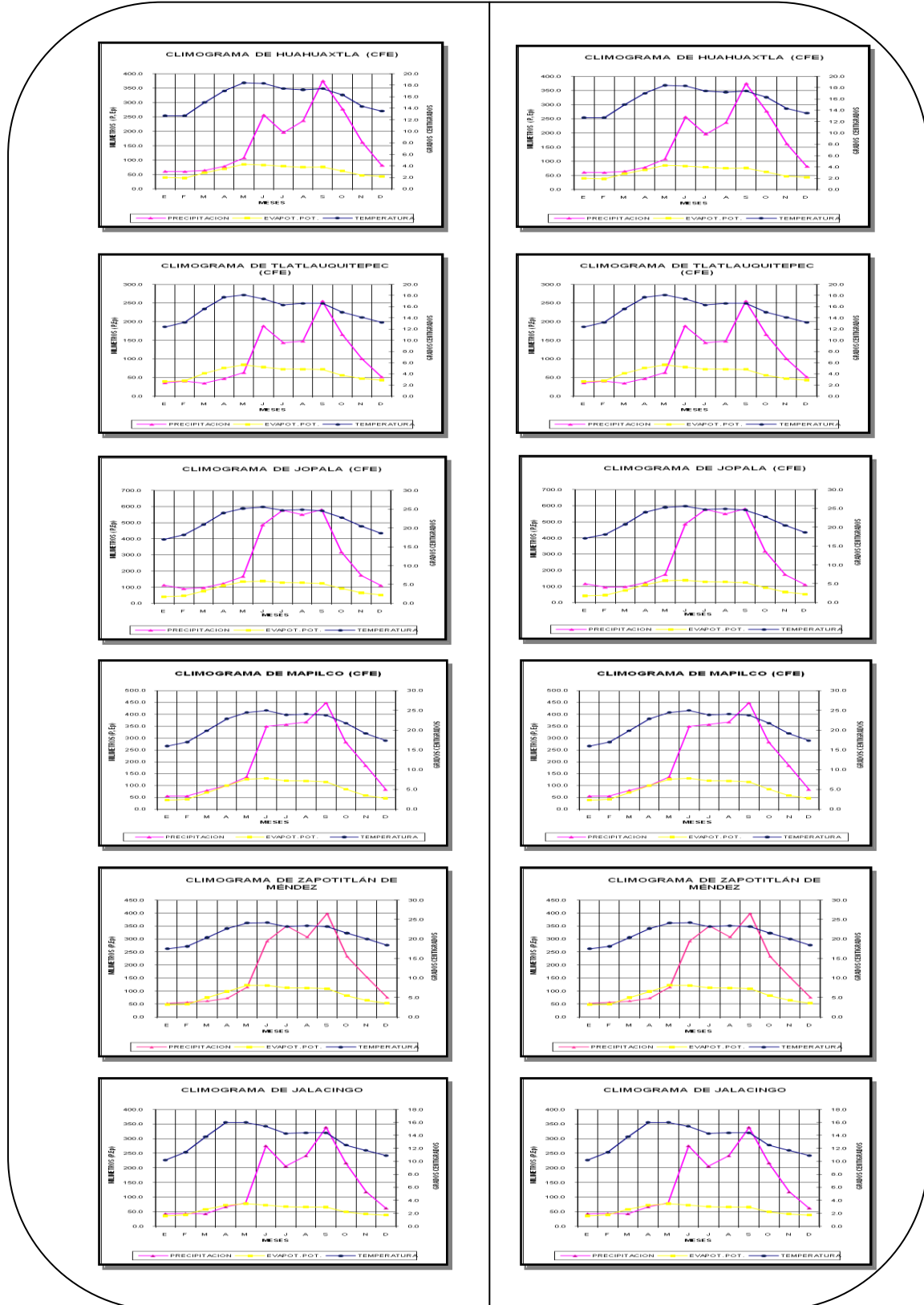


Fig 19. Climogramas correspondientes al periodo A

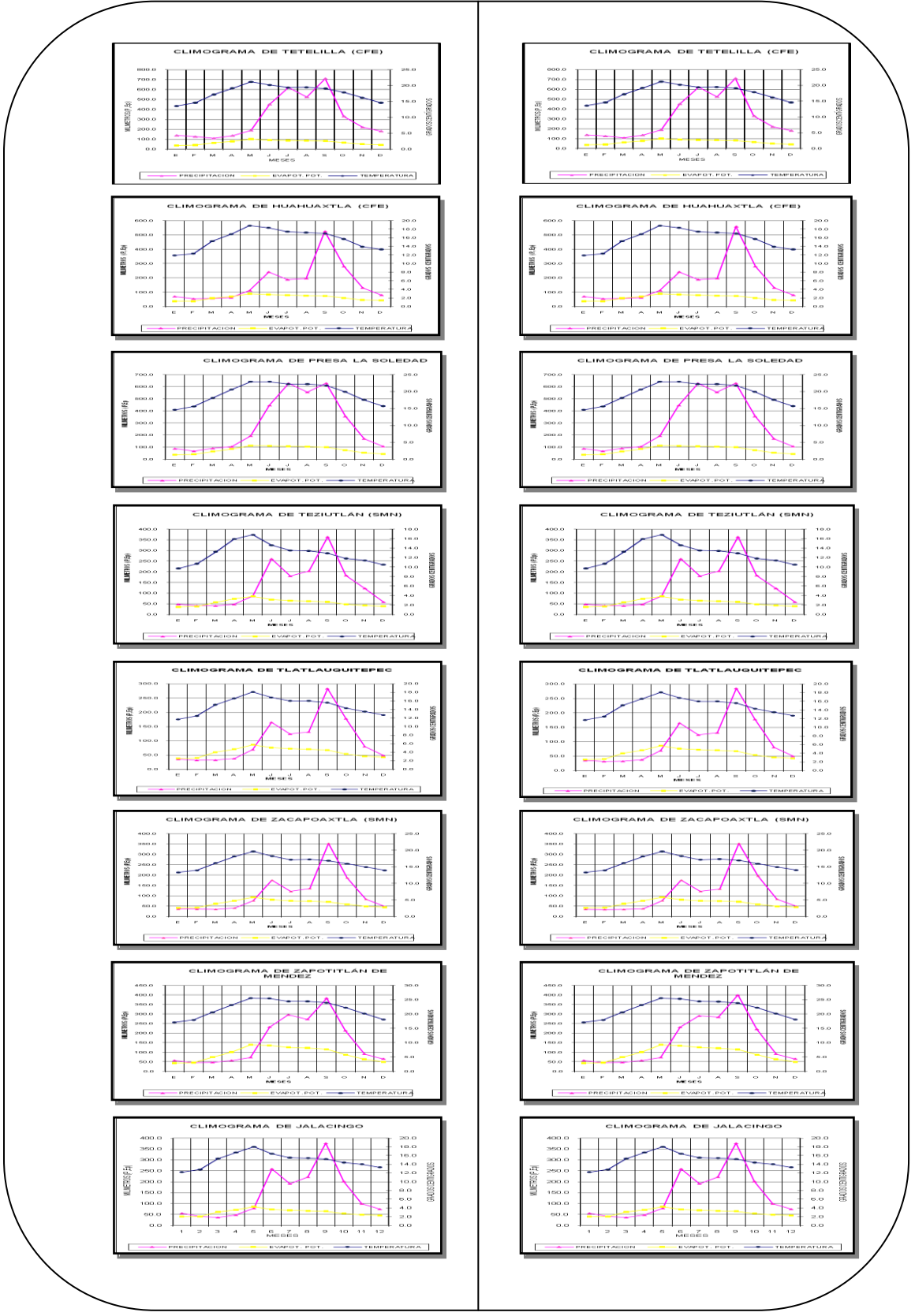


Fig. 20. Climogramas correspondientes al periodo B

IV.1.4 Regímenes de Humedad y Temperatura

La materia orgánica del suelo (MOS) es el mayor reservorio de carbono orgánico en la biosfera, cualquier cambio en su velocidad de descomposición debido al cambio climático llevaría tanto a un intercambio positivo o negativo a las concentraciones de CO₂ atmosférico, por lo que se han usado varios parámetros para representar los efectos de la temperatura en modelos de la MOS. Las respuestas a los cambios en la humedad del suelo se han evaluado generalmente en corto plazo en experimentos en laboratorio a temperatura constante (Coûteaux *et al.*, 2001), de modo que su relevancia en condiciones de campo es cuestionable. Además, los modelos de la dinámica de la materia orgánica han relacionado esa respuesta a los valores predichos de humedad del suelo de los modelos de transferencia de calor y agua derivados de datos climáticos regionales y funciones respuesta se basan en los contenidos de humedad del suelo o potencial de agua (Jansson & Berg 1985; Andrén *et al.* 1992 en Coûteaux *et al.*, 2001) o derivados de la evapotranspiración potencial y precipitación (Parton *et al.* 1987 en Coûteaux *et al.*, 2001).

El índice de humedad de Thornthwaite (Thornthwaite y Mather, 1955 en Grundstein, 2009), en particular, ha sido usado ampliamente en estudios de cambio climático y recursos hídricos. Muchos de estos estudios han usado modelos de circulación global para investigar cambios en la humedad en respuesta al forzamiento de gases de efecto invernadero (Mather y Feddema, 1986; McCabe *et al.*, 1990; McCabe y Wolock, 1992; Hodny y Mather, 1995 en Grundstein, 2009). Mather y Feddema (1986) y Hodny y Mather (1995) también han estudiado posibles cambios en los tipos de vegetación respondiendo al cambio climático (Grundstein, 2009).

Es por lo anterior que la aplicación del Método de Thornthwaite es de suma importancia específicamente en su versión de la segunda aproximación, que es con la versión con la que se cuenta.

En los Cuadros 9, 10 y 11 se muestran los diferentes regímenes, tanto de humedad como térmicos, que se presentaron en los periodos anteriormente mencionados (información obtenida de los climogramas). Puede observarse, que en la zona de estudio (en todos los periodos y estaciones analizados, excepto en un caso) siempre existe la humedad necesaria o en algunas ocasiones un exceso de humedad, a excepción de los casos de Oyameles, Acajete, Perote y Alchichica (en el periodo C). Con respecto al régimen térmico oscila entre el térmico e isotérmico, pasando por hipertérmico e isoméxico, por lo que la temperatura en la región oscila entre los 8°C y >22°C.

Cuadro 9. Regímenes de Humedad y Térmicos para las estaciones del periodo A

Estación		Régimen Humedad	Régimen Térmico
a)	Huahuaxtla	Perúdico	Isotérmico
b)	Tlatlauquitepec	Údico	Isotérmico
c)	Jopala	Perúdico	Hipertérmico
d)	Mapilco	Perúdico	Térmico
e)	Zapotitlán de Méndez	Údico	Isotérmico
f)	Jalacingo	Údico	Isoméxico

Cuadro 10. Regímenes de Humedad y Térmicos para las estaciones del periodo B

Estación		Régimen Humedad	Régimen Térmico
g)	Tetelilla	Perúdico	Isotérmico
h)	Huahuaxtla	Perúdico	Isotérmico
i)	Presa La Soledad	Perúdico	Térmico
j)	Teziutlán	Údico	Isoméxico
k)	Tlatlauquitepec	Údico	Isoméxico
l)	Zacapoaxtla	Údico	Isotérmico
m)	Zapotitlán de Méndez	Údico	Térmico
n)	Jalacingo	Údico	Isoméxico

Cuadro 11. Regímenes de Humedad y Térmicos para las estaciones del periodo C

Estación		Régimen Humedad	Régimen Térmico
ñ)	Oyameles	Ústico	Isoméxico
o)	Teziutlán	Údico	Isotérmico
p)	Jalacingo	Údico	Isotérmico
q)	Acajete	Ústico	Isotérmico
r)	Altotonga	Údico	Isoméxico
s)	Las Minas	Údico	Isotérmico
t)	Perote	Árido y Tórrico	Isoméxico
u)	Alchichica	Árido y Tórrico	Isoméxico

IV.1.5 Mapas de Isothermas e Isoyetas

A manera de validación de los resultados obtenidos de los climogramas se elaboraron los mapas de isothermas e isoyetas. En nuestro caso, el método operativo empleado ha consistido en la búsqueda de los datos climáticos básicos (ERIC II, 2000), afortunadamente el espacio temporal de disposición de datos es bastante amplio (45 años), lo que proporciona bastante fiabilidad a los resultados obtenidos. Con estos datos, hemos aplicado

diversas técnicas (medias aritméticas, kriging, etc.) a través del programa Golden Software Surfer v. 8.

En concreto, generamos los Mapas de Isotermas e Isoyetas de las estaciones correspondientes a los periodos con los que se hicieron los climogramas (datos tratados estadísticamente), así como con la totalidad de las estaciones termopluviométricas de la región en estudio (datos no tratados), para ver si existía diferencia en el comportamiento climático, durante los mismo periodos de tiempo establecidos con anterioridad, de donde se obtuvo lo siguiente:

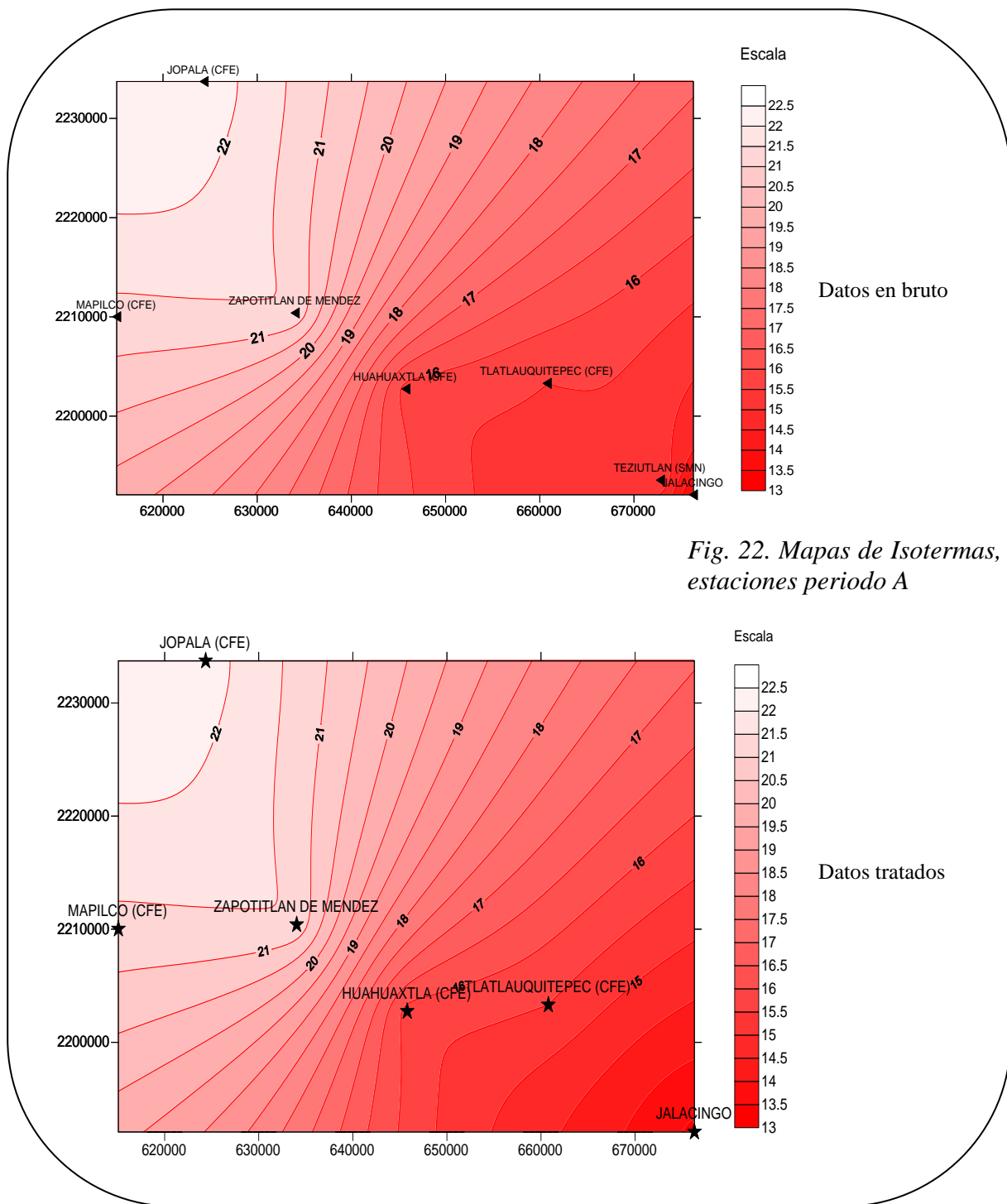


Fig. 22. Mapas de Isotermas, estaciones periodo A

De la Figura 22 notamos que, en el comportamiento térmico durante ese periodo existe una ligera variación con respecto de los datos tratados estadísticamente y sin tratar por debajo de la isolínea correspondiente a los 16°C, pero ésta es casi imperceptible por lo que podemos decir que el comportamiento térmico en la zona es prácticamente el mismo.

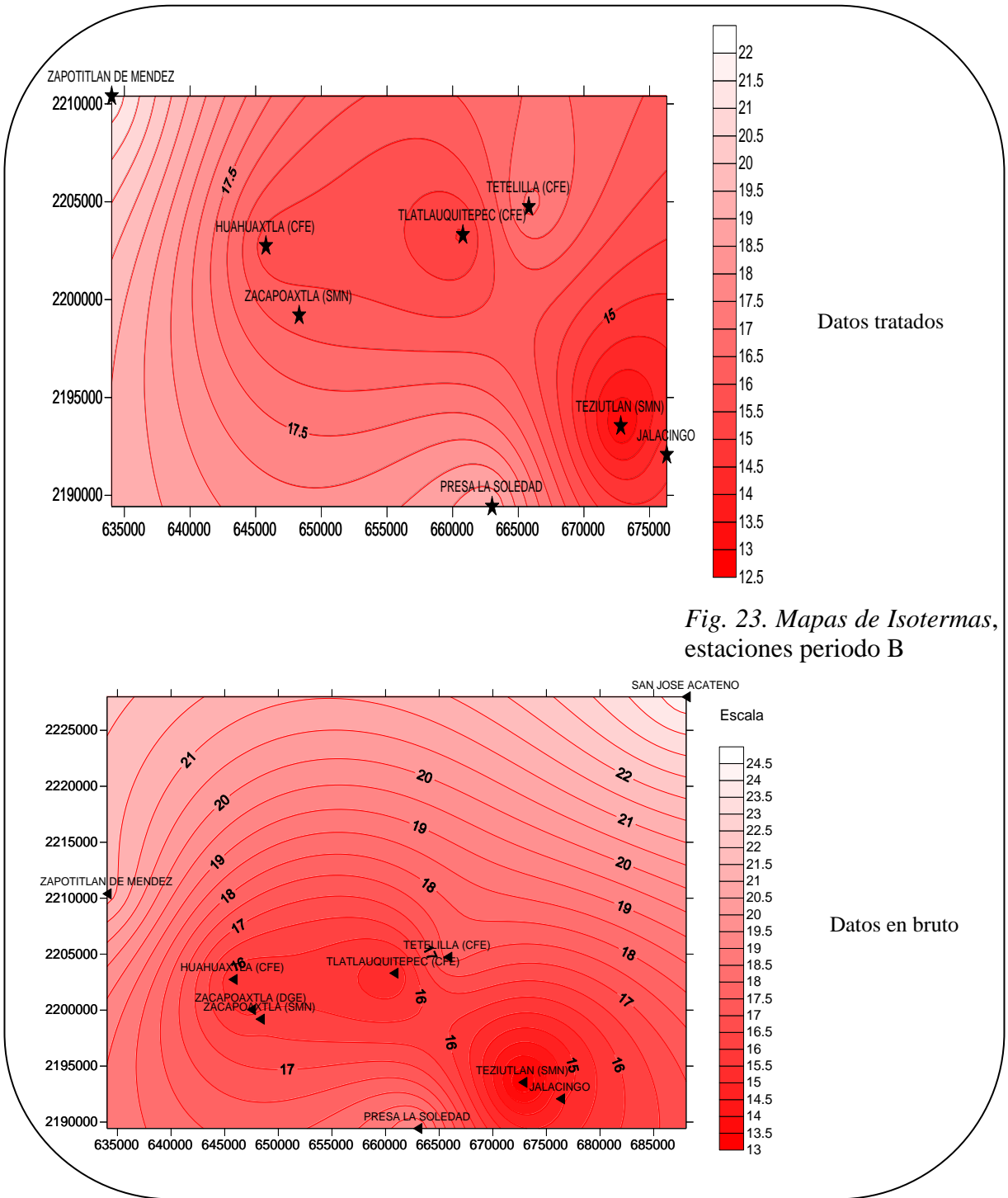
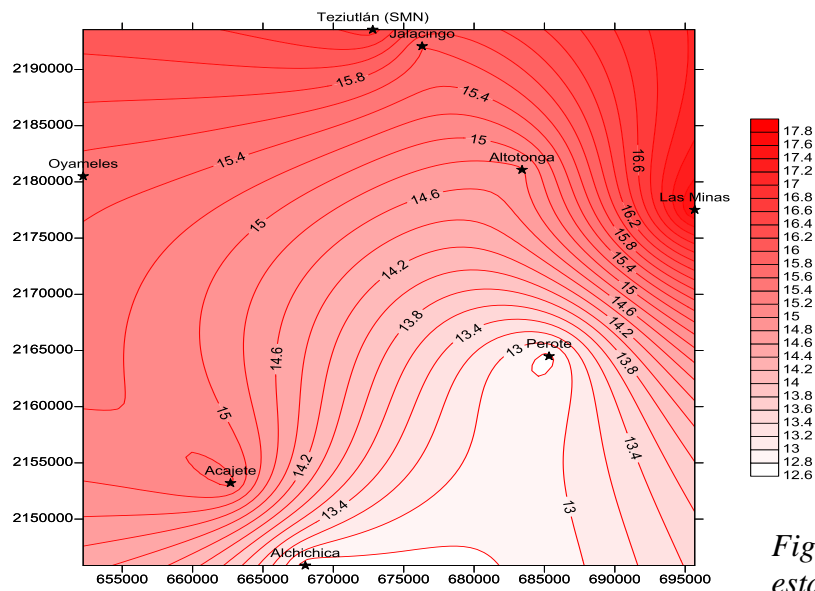


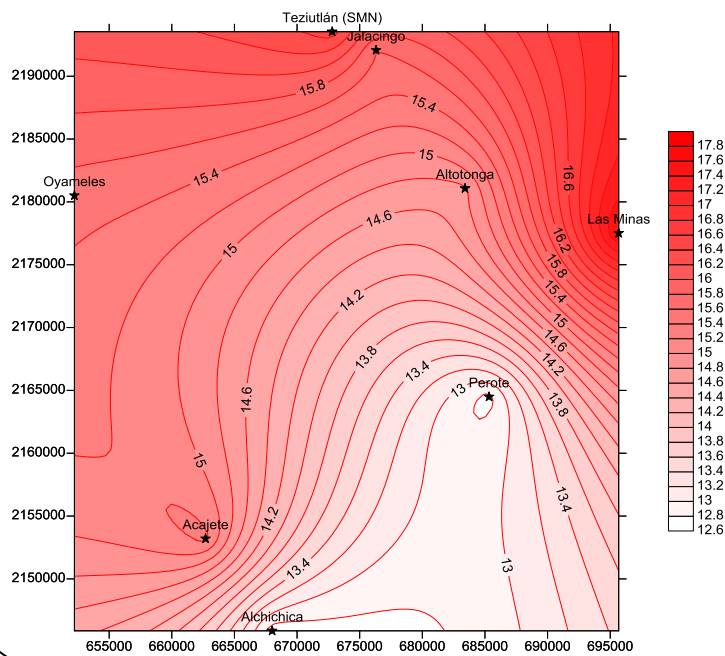
Fig. 23. Mapas de Isotermas, estaciones periodo B

De la Figura 23, se observa que el mapa de datos tratados presenta el mismo comportamiento térmico con respecto al de datos en bruto, la diferencia básicamente radica sólo en que en el primero se presenta como un corte del segundo mapa, mostrando un panorama un poco más reducido del comportamiento en general, lo cual es evidente en las escalas presentadas en dichos mapas, lo cual se debe al manejo realizado de los datos para el periodo B.



Datos tratados

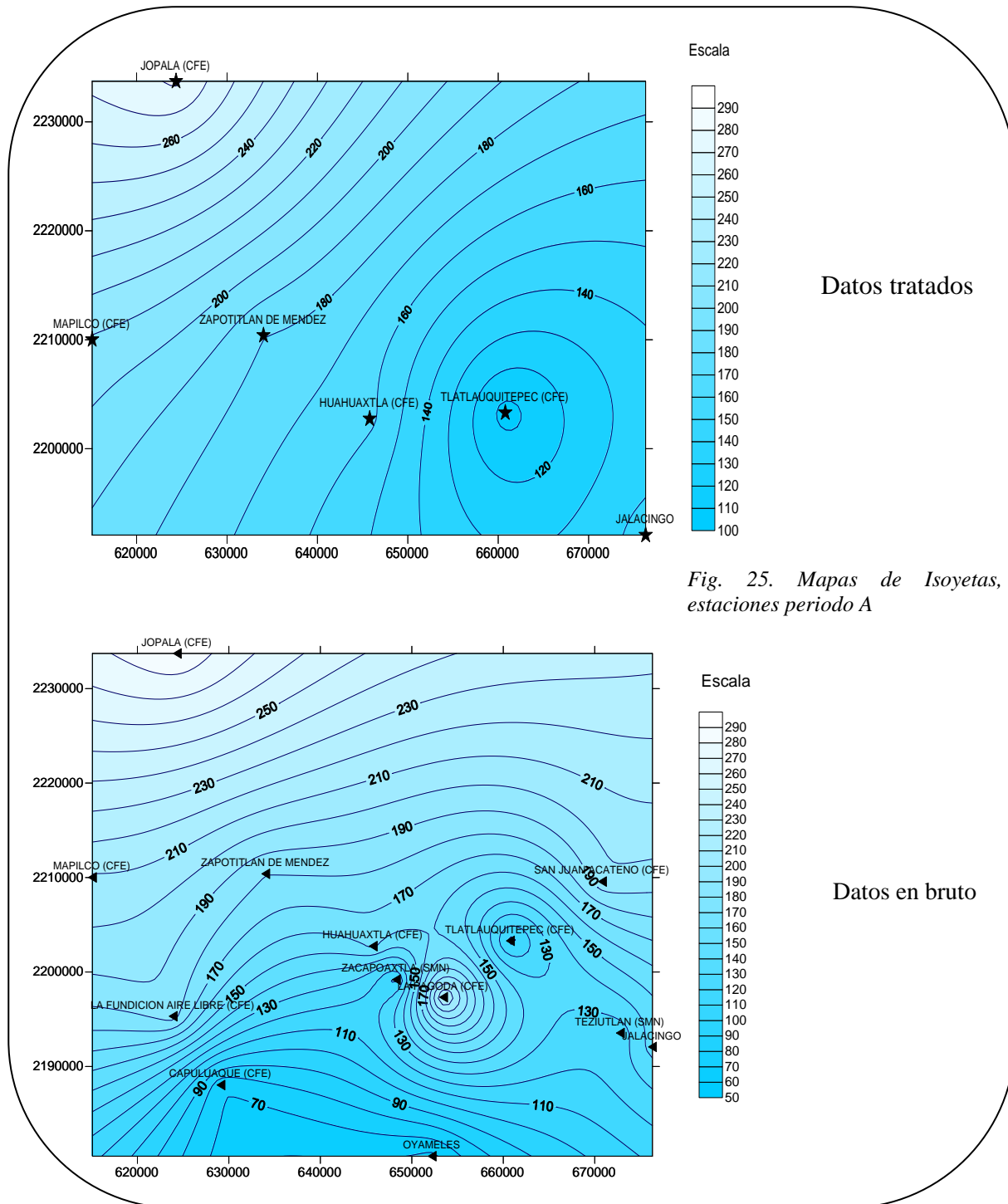
Fig. 24. Mapas de Isotermas, estaciones periodo C



Datos en bruto

De la Figura 24, vemos que no existe variación aparente en el comportamiento entre ambos mapas, para el periodo C.

Con lo que respecta a los mapas de Isoyetas de la región en los periodos estudiados se observó que:



En la Figura 25 se ve claramente que existe una variación en el comportamiento del perfil de precipitaciones de la zona, lo cual nos evidencia una variación debida al tratamiento hecho a los datos, ya que se pierde mucha información.

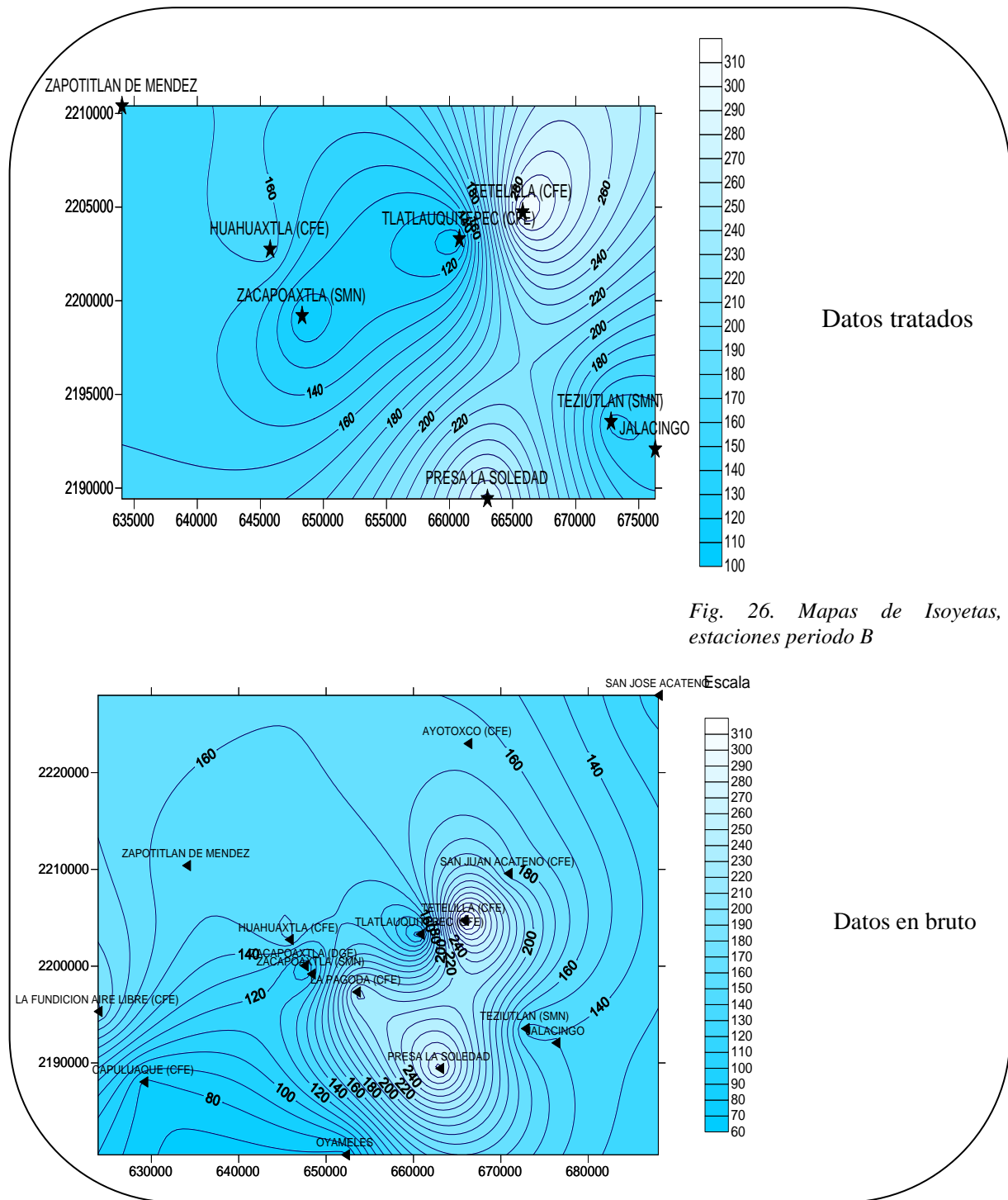


Fig. 26. Mapas de Isoyetas, estaciones periodo B

De la Figura 26 vemos que el comportamiento del perfil de precipitaciones es prácticamente el mismo en ambos casos y que el primer mapa se presenta como un corte del segundo.

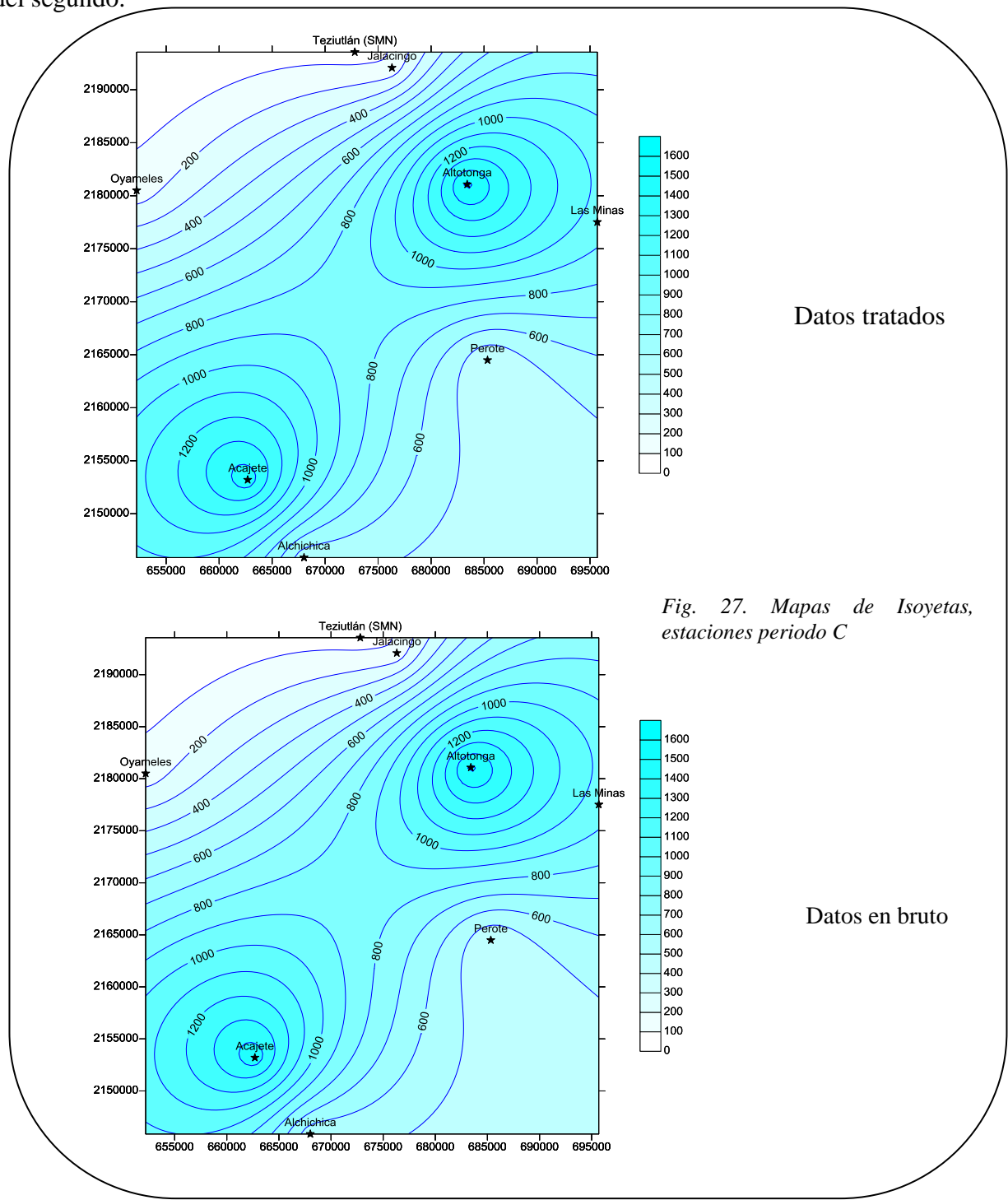


Fig. 27. Mapas de Isoyetas, estaciones periodo C

De la Figura 27, observamos que no existe diferencia en el perfil de precipitación de la zona entre los datos tratados estadísticamente con respecto a los datos no tratados para el periodo C, por lo que la precipitación sigue el mismo comportamiento en ambos casos.

IV.2 Establecimiento de las Bases de Datos y Análisis de Datos (1987)

Se amplió el acervo de información, agregándose la información concerniente a 51 perfiles referente al medio físico y a los análisis de laboratorio, dando un total de 72 perfiles de suelo localizados (Fig. 28).

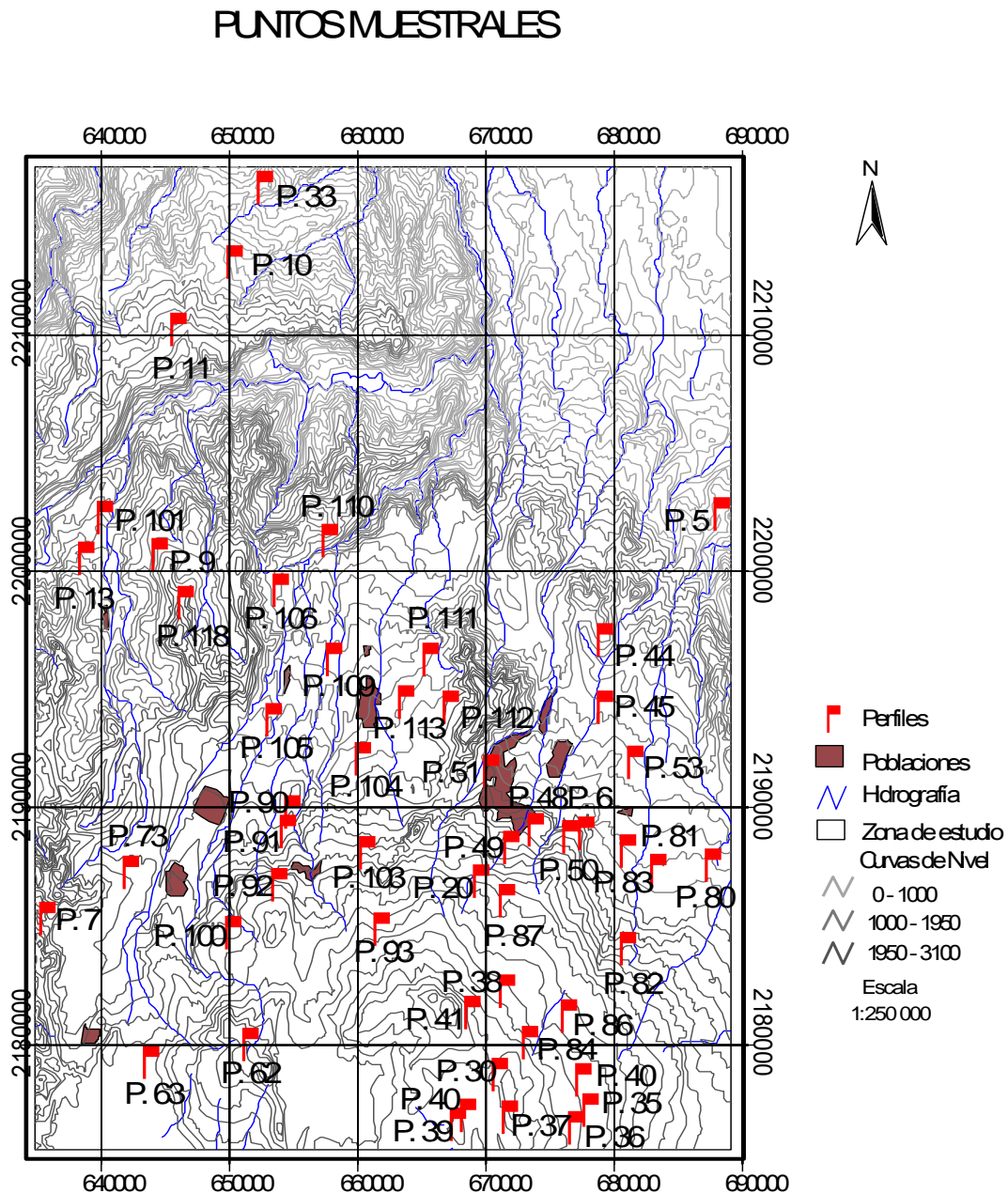


Fig. 28. Mapa de ubicación de los puntos muestrales (1987)

IV.2.1 Análisis Descriptivos del Carbono en Suelos

A lo largo del estudio aquí expuesto, se utilizan tres formas de medición del carbono en suelos. Dichas formas son: % de Materia Orgánica (%M.O.), % de Carbono Orgánico (%C Org.) y Carbono Orgánico en Suelos (COS), que se encuentran definidos de la siguiente manera:

$$\%C \text{ Org.} = ((B-T)/g) * (N)*0.39*mfc$$

donde:

B es el volumen de sulfato ferroso usado para valorar el blanco de reactivos

T es el volumen de sulfato ferroso usado para valorar la muestra

g es el peso de muestra empleada

N normalidad exacta de la solución de sulfato ferroso usada

mfc factor de corrección de humedad

$$\% \text{ M. O.} = \%C \text{ Org} * 1.724$$

Finalmente,

$$\text{COS (ton/ha)} = \%C \text{ Org.} * \text{Profundidad de la muestra} * \text{Densidad de la muestra}$$

En el Cuadro 12 se destaca la alta variabilidad de las variables; en particular, el COS muestra un valor de desviación estándar superior al valor de la media de los datos.

Cuadro. 12. Estadísticos Descriptivos de los Datos de C generados

Variable	No. De Individuos	Media	Desv. Est.	Mínimo	Mediana	Máximo
%M.O.	42	6.795	4.505	0.400	6.600	18.100
%C Org.	42	3.940	2.617	0.200	3.800	10.500
COS (ton/ha)	42	67.4	92.3	5.14	37.5	481.9

Cuadro. 13. Correlaciones de los Datos de C generados

	%M.O.	% C Org.	COS (ton/ha)
%M.O.	1.000	1.000	0.400
% C Org.	1.000	1.000	0.399
COS (ton/ha)	0.400	0.399	1.000

En el Cuadro 13 se muestra las correlaciones positivas del COS con las otras dos mediciones y, al hacer una prueba de hipótesis sobre la independencia entre COS y esas dos variables, se comprueba con un nivel de significancia del 10%, que existe relación lineal entre dichas variables.

El Cuadro 14 brinda la descripción de las profundidades de los tres horizontes del suelo.

Cuadro. 14. Estadísticos Descriptivos sobre PROFUNDIDAD (cm)

Variable	Horizonte	No. de Individuos	Medi a	Desv. Est.	Mínimo	Mediana	Máximo
Profundidad (cm)	A	21	13.57	9.02	3.00	13.00	37.50
	B	17	44.09	24.61	17.50	35.00	97.00
	C	4	40.50	6.14	33.00	41.50	46.00

Entre los aspectos de interés de esta investigación se destaca el de la profundización del comportamiento del COS según las diferentes formaciones vegetales de la zona. El Cuadro 15 y la Figura 29 muestran que el Bosque Pino-Encino tiene la media más alta de COS, superando al del Bosque Mesófilo de Montaña. Obsérvese la gran variabilidad del COS existente en ambos tipos de formaciones vegetales.

Cuadro. 15. Estadísticos Descriptivos del COS por FORMACIÓN VEGETAL

Variable	Formación Vegetal	No. De Individuos	Media	Media del Error Estándar	Desv. Est.	C. V.
COS (ton/ha)	Agricultura de Temporal	12	39.26	7.10	24.60	62.65
	Bosque Pino-Encino	4	160.20	83.00	166.00	103.66
	Bosque Mesófilo	6	143.70	70.80	173.30	120.62
	Pastizal Inducido	4	57.30	21.00	42.00	73.32
	Pastizal Inducido de Bosque Pino	16	39.30	7.21	28.86	73.43

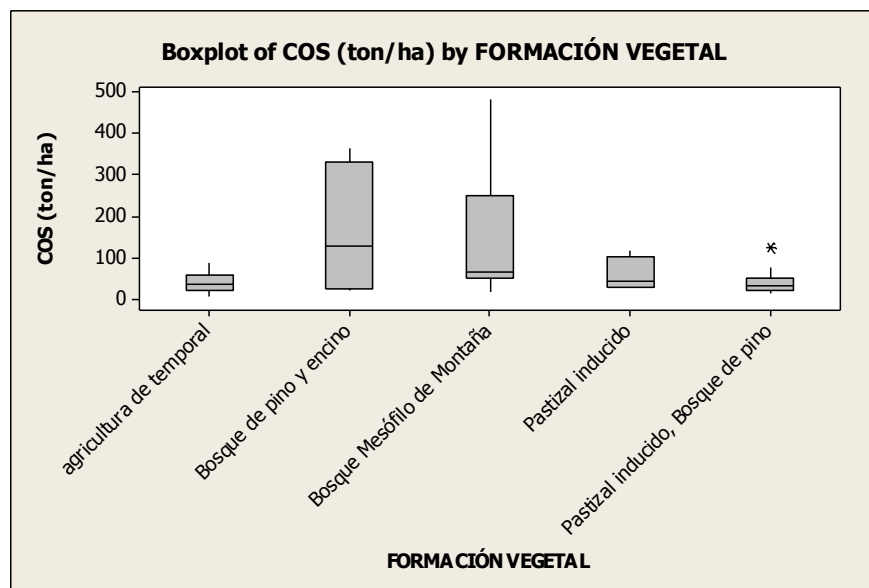


Fig. 29. Gráfica de cajas de COS (ton/ha) por FORMACIÓN VEGETAL

IV.2.2 Regresión PLS de %CO y otras Propiedades del Suelo

Con el propósito de obtener un conocimiento más profundo de la relación del carbono orgánico con otras propiedades del suelo, la información obtenida se analizó por la técnica de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (Partial Least Square en inglés PLS) (Hervé, 2007). Para dicho análisis, se tomó como variable dependiente del modelo el contenido en carbono orgánico total (%CO) y como predictores la Altitud y la Precipitación media anual, además de las siguientes propiedades del suelo: Profundidad, Densidad Aparente (DA), % Arena, % Limo, % Arcilla, Contenidos de Nitrógeno Total (%NT), Relación C/N, contenidos en Al y Fe activos (%Al y %Fe), retención de fosfatos, pH en NaF 1N, Acidez hidrolítica (ah) e intercambiable (ai), Delta pH, Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CIC), Porcentaje de saturación en bases (%V), Ca, Mg, Na y K Intercambiables. Los datos fueron analizados en el sistema Minitab (Minitab, 2005), donde la matriz de correlación de los predictores mostró una alta correlación entre los mismos. Los Cuadros y Figuras referidas en este epígrafe se encuentran en el ANEXO II para su consulta.

La Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales es un método para construir modelos predictivos cuando los factores son muchos y altamente colineales (Hervé, 2007), como es el caso que nos ocupa. Para llevar a cabo la regresión de Y (%CO) con las variables independientes X_1, \dots, X_p (DA, % Arena, % Limo, % Arcilla, %N Total, Relación C/N, %Al y %Fe extraíbles, retención de fosfatos, pH en NaF 1N, ah e ai, Delta pH, CIC, %V, Ca, Mg, Na y K Intercambiables), la regresión PLS trata de encontrar nuevos factores que juegan el mismo papel que las X's. Estos nuevos factores se llaman variables latentes o componentes. Cada componente es una combinación lineal de X_1, \dots, X_p , PLS usa tanto la variación de X como de Y para construir los nuevos factores que se usarán como variables explicatorias del modelo. Existen diferentes algoritmos para obtener los estimadores de la

regresión PLS, pero los más usados son el NIPALS y el SIMPLS (Montgomery *et al.*, 2004).

La Suma de Cuadrados de Error de Predicción, conocida como la estadística PRESS, se considera una medida de lo bien que funciona un modelo de regresión para predecir nuevos datos. Se define como la suma de los residuales PRESS al cuadrado que son los residuos que se obtiene entre el valor observado y el valor predicho de la *i*-ésima respuesta observada, basado en un ajuste de modelo con los *n*-1 puntos restantes de la muestra (Montgomery *et al.*, 2004).

Una aplicación muy importante de estos estadísticos es comparar modelos de regresión. En general un modelo con pequeño valor de PRESS es preferible a uno con PRESS grande. El estadístico R^2 utilizado usualmente para medir la bondad del ajuste del modelo a los datos: a mayores valores de estos estadísticos, mayor es la bondad del ajuste.

Del análisis realizado, el mejor modelo fue aquél definido con una sola componente principal, esto con una R^2 de 0.36 y un estadístico PRESS de 397. 3 respectivamente, lo cual se muestra en el Cuadro. II. El estadígrafo $F(1,40)$ fue significativo con un *p* empírico de 0.000, mostrado en el Cuadro. III. Las propiedades: DA, %NT, %Al, %Fe, CIC, ah y ai alcanzaron los más altos coeficientes estandarizados, referidos en el Cuadro. IV. Por otro lado, la influencia de los predictores sobre la respuesta se obtuvo de la tabla de saturaciones de la componente principal (Cuadro. V), destacándose la alta influencia de DA, ah y ai con signos negativos, y %NT, %Al, %Fe y CIC con signos positivos, con respecto al %CO, los cuales se muestran en la Figura IV. En la Figura III, se resalta la importancia de la DA como una de las propiedades de los suelos importantes para el modelo, por lo que se analizó también el modelo para dos componentes principales, esto para una mejor comprensión y visualización del fenómeno estudiado, de donde, se obtuvo la figura de la cual se hace mención. Se confirma así, la importancia de la DA como una propiedad que coadyuva a la comprensión del fenómeno de la dinámica del almacén de C en los suelos (Post *et al.*, 1999), así mismo en los suelos estudiados de esta zona (Linares *et al.*, 2005) y ratificada en trabajos posteriores (González *et al.*, 2008). Los suelos de esta región son de origen volcánico y presentan propiedades típicas de los Andisoles (Valera *et al.*, 2006). Por otra parte, se destaca la influencia sobre la respuesta (%CO) de los elementos altitud (con signo negativo) y precipitación (con signo positivo), lo que ratifica la influencia de algunas condiciones ambientales sobre el %CO del suelo (Cuadro. V).

IV.2.3 Análisis Comparativo del Almacenamiento de carbono Orgánico en diversos Suelos bajo diferentes tipos de Bosques

Se consideró importante, hacer algunos análisis comparativos sobre el almacenamiento de carbono orgánico en suelo. Estos estudios comparativos ayudan a conocer y comparar la información existente con respecto a los suelos como almacenes de carbono. Los Cuadros referidos a continuación se encuentran en el ANEXO III para su consulta.

Las características generales de las regiones estudiadas se presentan en la Cuadro. VI. Los suelos forestales analizados son: de un bosque pino-encino (BPE) y de un bosque Mesófilo

de montaña (BMM) de la Región de Teziutlán, Puebla, México (TM) contra un bosque templado caducifolio (BTC) de España (NE), tres encinares (BE1, BE2, BE3) (AL, EB, VÑ), un robledal (BR) (MB) y un pinar (BP) (AM) también en España (Linares *et al.*, 2008; García Oliva *et al.*, 2006). Posteriormente aparecen, en el Cuadro VII, los contenidos de carbono orgánico de estos suelos.

Se obtuvo la información de las concentraciones de carbono correspondientes a muestras de tres perfiles de suelo de NE (García Oliva *et al.*, 2006), los contenidos de carbono orgánico de muestras de 5 perfiles de suelo representativos de las regiones de Ciudad Real (AL), Albacete (EB), Guadalajara (VÑ y AM) y Toledo (MB). En TM se tomaron en 21 perfiles de suelo representativos de la región y sus concentraciones de carbono fueron determinadas por el método de Walkley y Black. Para la obtención de sus contenidos de carbono en suelo, se realizaron los cálculos en todos los casos, considerando la densidad aparente para cada horizonte. El cálculo de la densidad aparente se determinó a partir de la ecuación siguiente:

$$Da. = \frac{\text{Peso seco del suelo} - (\text{peso de raíces} + \text{piedras} + \text{residuos})}{\text{Vol. del cilindro de muestreo} - (\text{Vol. de raíces} + \text{Vol. piedras} + \text{Vol. residuos})}$$

Siendo el volumen del cilindro:

$$\pi r^2 h$$

h: altura del cilindro

r: radio del cilindro

Considerando los volúmenes y pesos de raíces, piedras y residuos, ya que estos datos se utilizan para corregir la densidad aparente del suelo, mediante la fórmula anterior. El cálculo del carbono se obtiene en unidades de toneladas por hectárea, mediante la siguiente fórmula:

$$C \text{ (ton/ha)} = \text{Porcentaje de carbono} * \text{profundidad de la muestra} * \text{densidad de la muestra}$$

Tomando las consideraciones pertinentes de las profundidades y la transformación de unidades pertinentes (Etchevers *et al.*, 2005).

Como puede observarse en el Cuadro. VI., existe una cierta similitud en cuanto a las condiciones ambientales presentes en los sitios de Teziutlán, México y el de Navasfrías, España, con vegetación del tipo templado, aunque con ciertas variaciones, en el ambiente mexicano abundan varias especies de encino y otros árboles caducifolios.

Como se muestra en la Cuadro. VII., los sitios de Teziutlán, México presentan unos contenidos de carbono del suelo (COS) de 143.7 y 54.7 ton/ha respectivamente, en comparación al sitio en Navasfrías, España que presenta un COS de 103 ton/ha y las regiones de Almadén en Ciudad Real, El Bonillo en Albacete, Mirabueno en Guadalajara, Almorox en Toledo y Viñuelas en Guadalajara, todos los anteriores con valores de COS de 157.5, 55.68, 161.28, 79.92 y 115.5 ton/ha respectivamente. De donde, de forma visual se

deduce que el BMM de la región de Teziutlán junto al BE1 de Almadén y el BR de Mirabueno presentan los mayores COS. De igual manera notamos que el BPE de la Región de Teziutlán presenta el contenido más bajo en COS. Esto se debe, en parte por las altas densidades aparentes que se presentan en los suelos, de manera generalizada en los últimos cinco sitios de España mostrados en el Cuadro. VI, lo cual puede asociarse al alto grado de compactación que estos presentan debido al uso inadecuado de la maquinaria que se utiliza en terrenos de reforestación. La pérdida de los horizontes superficiales y el deterioro de las propiedades físicas de los suelos, resultantes de la mecanización más o menos agresiva, puede conducir a una disminución de la productividad y del mismo secuestro de C.

Debido a que se cuentan con los datos observados de los sitios de la Región de Teziutlán, Puebla, México, se decidió realizar la comparación de los COS del BMM y del BPE con respecto a los valores medios de los demás bosques, utilizando la prueba t para una muestra. Además, se realizó la comparación de las medias entre el BMM y BPE, a través de la prueba de t-student para dos muestras.

Al contrastar el COS del BMM con la media de los demás bosques (por orden de aparición) se observó lo siguiente: estadísticamente no existe diferencia significativa entre las medias de los COS del BMM contra los demás bosques analizados, lo que se muestra de manera condensada en el Cuadro. VIII. Observamos en la tabla que los valores de p empírico son mayores que el nivel de significación de 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula de que la media del COS del BMM es igual al valor medio de cada uno de los bosques considerados.

En el Cuadro. IX., se muestra la comparación de las medias de los COS del BPE contra los demás bosques, observándose que existe diferencia significativa, al nivel de significación de 0.05, entre los valores medios de COS, a excepción de los sitios de El Bonillo.

En el Cuadro. X. se muestran los resultados de algunos estadísticos descriptivos del COS del BPE y del BMM. El estimador para la diferencia de las medias poblacionales comparadas, esto es $\mu_{BPE} - \mu_{BMM}$, fue de -89.0047, con un intervalo de confianza del 95% para la diferencia de (-273.187, 95.178). La prueba t-student de la diferencia tuvo un valor de t de -1.24 y un p-value de 0.269, por lo que se observa claramente que no existe diferencia significativa entre las medias del COS de los grupos comparados.

Por otro lado, el almacenamiento tanto en sistemas forestales como en sistemas agrícolas puede ser equiparable, aunque depende del tipo de manejo que se les dé a estos últimos. A este respecto, la deforestación y el cambio de uso del suelo tienen un impacto importante tanto sobre los almacenes y flujos de carbono como en los bioelementos que existen originalmente en los bosques nativos; además, sobre el ciclo global del Carbono. Dentro de México, en regiones tropicales es común el abandono de tierras cultivadas, por lo que se presentan un amplio mosaico de bosques secundarios de regeneración a través del paisaje, debido a eso, actualmente existe un interés considerable en el uso potencial de los suelos para secuestrar carbono para la mitigación del cambio climático (Gamboa *et al.*, 2008).

También debe ser tomada en consideración la elección de especies forestales de elevada productividad, especies para obtención de madera de calidad o especies que generen una mayor cantidad de biomasa y humus.

Se valora la capacidad de diversos suelos forestales (con especies dominadas por pinos, encinos, robles, y especies tropicales) como verdaderos sumideros de C. Los resultados ponen de manifiesto la importancia que tiene el tipo de vegetación en cuanto a su influencia en la producción y, lógicamente, en la fijación del C, por lo que se observa que los suelos tienen un elevado potencial de fijación de C.

Así mismo, es evidente que la concentración de C es menor en aquellos suelos reforestados, lo que sugiere la posibilidad de mejorar el manejo del sistema para propiciar un mayor almacenamiento de C, de tal forma que se alcancen niveles equivalentes a los de los sistemas forestales. Es recomendable utilizar terrenos degradados para producir biomasa, pero también debemos considerar formas de manejo para secuestrar C. Es necesario generar información sobre la capacidad que tienen los suelos para secuestrar o almacenar carbono.

Para los suelos donde fue posible la comparación, la concentración de C es menor en aquellos suelos con vegetación de coníferas. En plantaciones manejadas, debido al uso de maquinaria, la densidad aparente de los suelos es alterada por compactación y esto genera problemas para la estimación del carbono secuestrado.

IV.2.4. Distribución Espacial de los Contenidos de Carbono Orgánico

Como señalamos anteriormente, el índice de humedad de Thornthwaite (Thornthwaite y Mather, 1955 en Grundstein, 2009) ha sido usado ampliamente en estudios de cambio climático y recursos hídricos. Muchos de estos estudios han usado modelos de circulación global para investigar cambios en la humedad en respuesta al forzamiento de gases de efecto invernadero (Mather y Feddema, 1986; McCabe *et al.*, 1990; McCabe y Wolock, 1992; Hodny y Mather, 1995 en Grundstein, 2009).

El objetivo es determinar la relación climática de la distribución espacial de los contenidos de Carbono Orgánico en los Suelos (COS) de los horizontes A y B de suelos volcánicos de la Región de Teziutlán, en el estado de Puebla, México.

Se realizó una prospección de los suelos volcánicos, y se estimaron los regímenes de humedad y temperatura de los suelos de la zona usando el Método de Thornthwaite en su segunda aproximación, obteniéndose sus climogramas, los mapas de isotermas e isoyetas. Finalmente, se relacionaron las variables climáticas con la distribución espacial de los contenidos de COS. Los datos fueron procesados en Golden Surfer Software (Golden Surfer, 2008).

Por lo que en los regímenes de humedad Údicos la sección de control de humedad no está seca en cualquier parte por 90 días acumulados en años normales, además la temperatura media anual del suelo es menor de 22°C y si las temperaturas medias en invierno y verano a una profundidad de 50 cm de la superficie del suelo difieren de 6°C o más, además la

sección de control de humedad del suelo, en años normales, está seca en todas partes por menos de 45 días consecutivos en los cuatro meses siguientes al solsticio de verano. Estos regímenes son comunes en suelos de climas húmedos que tienen bien distribuidas las lluvias, que tienen suficiente lluvia en verano de modo que la cantidad de humedad almacenada más la precipitación es aproximadamente igual o excede la cantidad de evapotranspiración, o tiene adecuadas lluvias en invierno para recargar los suelos y veranos fríos. Y en los regímenes Ústicos, la precipitación excede la evapotranspiración en todos los meses de años normales, la tensión de humedad rara vez alcanza los 100 kPa en la sección de control de humedad del suelo, aunque hay breves periodos ocasionales donde algo del agua almacenada se congela (Soil Survey Staff, 1999).

El régimen de humedad ústico es uno intermedio entre el régimen arídico y el údico. Su concepto es de uno de humedad limitada pero presente en el momento en que las condiciones son adecuadas para el crecimiento de la planta. Si la temperatura media anual es de 22 °C o mayor o si la temperatura media del suelo en verano e invierno difiere de menos de 6°C a una profundidad de 50 cm debajo de la superficie del suelo, la sección de control de humedad del suelo en áreas con régimen de humedad ústico está seca en algunas partes por 90 días o más consecutivos en años normales. Está húmedo, sin embargo, en algunas partes por más de 180 días acumulados por año o por 90 o más días consecutivos.

Con los climogramas (*Fig. 22 y Cuadro. 11.*) se logró establecer los regímenes de temperatura del suelo en la zona, los cuales se presentaron como Isotérmico e Isomésico (*Cuadro. 11.*) de acuerdo con los criterios de la Soil Survey Staff, 1999.

Por lo que en los regímenes Térmicos la temperatura media anual del suelo es de 15°C o mayor pero menor de 22 °C, y la diferencia entre las temperaturas medias del suelo en verano e invierno es mayor de 6°C a una profundidad de 50 cm de la superficie del suelo. Y para los Isotérmicos la temperatura media anual del suelo es de 15°C o mayor pero menor de 22°C. Para los regímenes Isomésicos la temperatura media anual del suelo es de 8°C o mayor pero menor de 15°C (Soil Survey Staff, 1999).

El almacenamiento del COS se concentra en la parte noreste del sitio, como se observa en la Fig. 30.

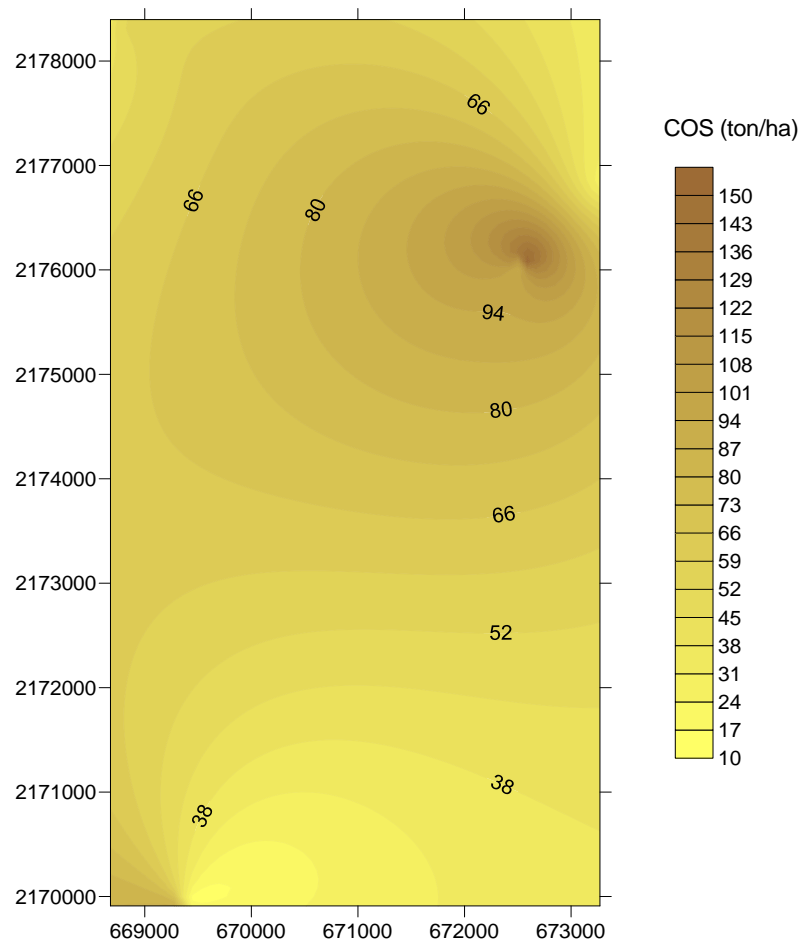


Fig. 30 Mapa de distribución espacial del COS (1987)

IV. 2.5 Estimación del Carbono Orgánico en Suelos según Regímenes de Humedad y Temperatura

La clasificación de los regímenes de humedad y temperatura que aparecen en el cuadro siguiente, correspondientes al primer período de análisis de los datos, permite el desarrollo de modelos que estiman la densidad de carbono orgánico, según estas clases.

Puede apreciarse, también que la estrecha relación entre ambos regímenes, lo que se expresa a través de la prueba Chi cuadrado.

Cuadro. 16. Estadísticos de la Prueba Chi – cuadrada para Regímenes de Temperatura vs Regímenes de Humedad

RÉGIMEN DE TEMPERATURA	ISOMÉSICO	ISOTÉRMICO	TÉRMICO	TODOS	
RÉGIMEN DE HUMEDAD					
PERÚDICO	0	4	16	20	Individuos
	8.571	3.810	7.619	20	Individuos estimados
	8.5714	0.0095	9.2190	*	Chi cuadrado
ÚDICO	18	4	0	22	Individuos
	9.429	4.190	8.381	22	Individuos estimados
	7.7922	0.0087	8.3810	*	Chi cuadrado
TODOS	18	8	16	42	Individuos
	18	8	16	42	Individuos estimados
	*	*	*	*	Chi cuadrado

Chi cuadrado = 33.982

Grados de Libertad = 2

p-value = 0.000 Por lo que se rechaza la hipótesis de independencia *

grado de colinealidad del chi cuadrado = 47.039

grados de libertad = 2

p-value = 0.000 Por lo que se rechaza la hipótesis de independencia *

Por lo anteriormente expuesto, se afirma y realiza la existencia de dependencia entre los regímenes de humedad y temperatura que se presentan en la zona, debido a que los valores de p son aproximadamente nulos.

Los cuadros y gráficos que aparecen a continuación caracterizan descriptivamente, el comportamiento de estos regímenes.

Cuadro. 17. Estadísticos Descriptivos del COS por RÉGIMEN DE HUMEDAD PERÚDICO

VARIABLE	RÉGIMEN TEMPERATURA	No. Individuos	Media	Media de error estándar	Des. Est.
COS(ton/ha)	Isotérmico	4	206.0	95.1	190.1
	Térmico	16	35.35	4.92	19.67

Cuadro. 18. Estadísticos Descriptivos del COS por RÉGIMEN DE HUMEDAD ÚDICO

VARIABLE	RÉGIMEN TEMPERATURA	No. Individuos	Media	Media de error estándar	Des. Est.
COS(ton/ha)	Isomésico	18	44.55	7.05	29.93
	Isotérmico	4	160.2	83.0	166.0

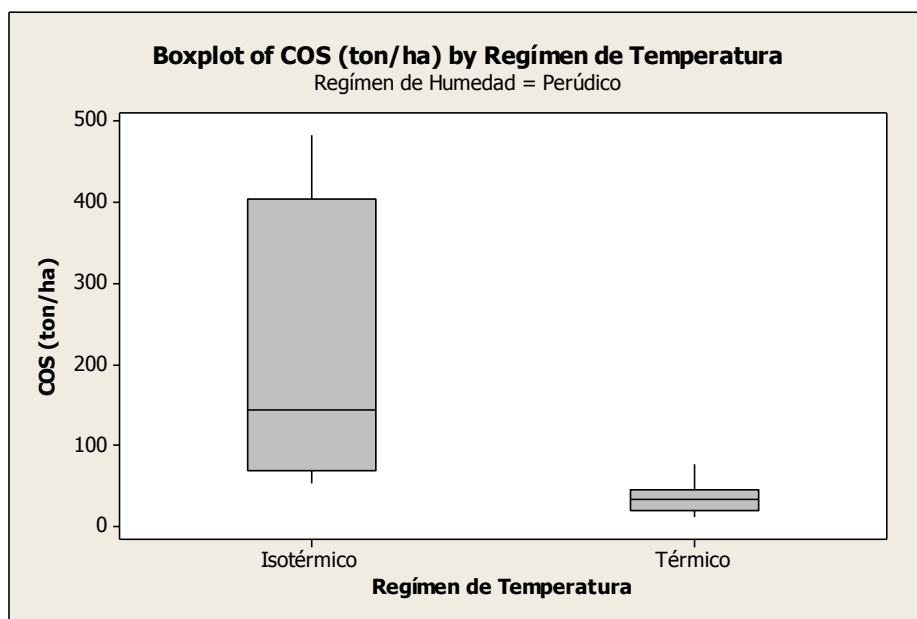


Fig. 31 Gráfica de cajas entre COS (ton/ha) y Régimen de Temperatura

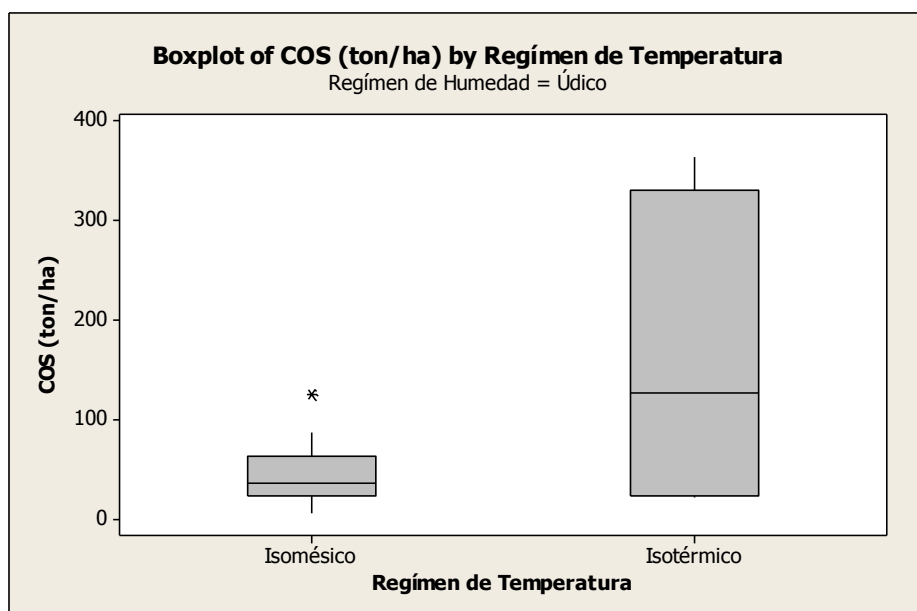


Fig. 32 Gráfica de cajas entre COS (ton/ha) y Régimen de Temperatura

IV. 2.6 Enfoques de Regresión en el estudio de la relación del COS y de las variables Climáticas

Linares *et al*, 2009 dieron la estimación del carbono acumulado promedio de los suelos de origen volcánico, identificados como Andosoles, de la Caldera de Teziutlán, Puebla, México. La estimación fue de 9.5×10^{-7} Pg (1Pg = 1015g) pero se señaló que el incremento de COS depende del tipo de suelo inserto en una condición de clima (temperatura y humedad, entre otros) que dará la capacidad potencial con que las tasas de entrada y salida se produzcan. Una vez incorporado al estudio estas condiciones climáticas, se ha considerado que las técnicas de regresión pueden coadyuvar a obtener estimaciones de COS más precisas en esta zona. A continuación se exponen dos enfoques de la regresión que se ajustan a los objetivos planteados.

(a) Regresión polinomial

Utilizando el procedimiento de Regresión Polinomial del sistema MINITAB 16 se realizó el Análisis de Regresión que se explica a continuación. El Cuadro 19 muestra seis ecuaciones de regresión por cada combinación de régimen de humedad y de temperatura, el análisis se realizó con el logaritmo neperiano de COS (lnCOS) logrando que los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza de los errores aleatorios se cumplieran. Cada una de estas ecuaciones predice el logaritmo de COS por la temperatura media y la precipitación media del período. Obsérvese que los coeficientes de regresión de la temperatura y la precipitación son los mismos para todas las combinaciones de los regímenes de humedad y temperatura, pero el intercepto es diferente en todos los casos.

El análisis exploratorio previo mostró que la variable dependiente contenido de COS, medida en toneladas por hectáreas (ton/ha) no se distribuye normal por lo que se utilizó la transformación de Box-Cox con lambda redondeada a 0. El intervalo de confianza al 95% para lambda es de (-0.285, 0.235). Por tanto, el análisis se realizó con el logaritmo neperiano de COS (lnCOS) logrando que los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza de los errores aleatorios se cumplieran.

Las observaciones 16, 25 y 30 mostraron los mayores residuos estandarizados, pero al no sobrepasar el valor tres no se consideraron datos aberrantes.

El Cuadro 19 muestra seis ecuaciones de regresión por cada combinación de régimen de humedad y de temperatura. Cada una de estas ecuaciones predice el logaritmo de COS por la temperatura media y la precipitación media del período. Obsérvese que los coeficientes de la temperatura y precipitación son los mismos para todas las combinaciones de regímenes de humedad y temperatura y que el coeficiente de temperatura es mucho mayor que el de precipitación.

En el Cuadro 20 aparecen los coeficientes de la ecuación de regresión, con sus correspondientes errores estándar, estadístico t y valor de p. El régimen de temperatura resultó significativo en el régimen de temperatura isotérmico pero no en el isométrico,

mientras que el régimen de humedad no resultó significativo. Este resultado apunta hacia la importancia de la temperatura en la predicción de la cantidad de carbono en suelo.

Aunque el coeficiente de determinación ($R^2 = 37.29\%$) es relativamente bajo, la prueba F, que aparece en el Cuadro 21, resultó significativa al 5%, luego el modelo se ajusta a los datos. De nuevo se destaca el régimen de temperatura como significativo con un valor de p empírico muy bajo.

Cuadro. 19. Ecuaciones de Regresión por combinación Régimen de Temperatura y Humedad

Régimen de Humedad	Régimen de Temperatura	Ecuación Regresión
Perúdic	Isomésico	$\ln(\text{COS}) = 0.363 + 0.141 \text{ Temp} + 0.007 \text{ Prec}$
Perúdic	Isotérmico	$\ln(\text{COS}) = 1.074 + 0.141 \text{ Temp} + 0.007 \text{ Prec}$
Perúdic	Térmico	$\ln(\text{COS}) = -1.221 + 0.141 \text{ Temp} + 0.007 \text{ Prec}$
Údico	Isomésico	$\ln(\text{COS}) = 0.694 + 0.141 \text{ Temp} + 0.007 \text{ Prec}$
Údico	Isotérmico	$\ln(\text{COS}) = 1.405 + 0.141 \text{ Temp} + 0.007 \text{ Prec}$
Údico	Térmico	$\ln(\text{COS}) = -0.889 + 0.141 \text{ Temp} + 0.007 \text{ Prec}$

Cuadro. 20. Ecuaciones de Regresión del contenido de COS vs Temperatura y Precipitación según Regímenes de Humedad y Temperatura

TÉRMINOS	COEF	COEF. ERROR EST.	T	P
Constante	0.23752	2.74230	0.08661	0.931
Temperatura Media (periodo)	0.14100	0.17618	0.80034	0.429
Precipitación Media (periodo)	0.00664	0.00533	1.24547	0.221
Régimen de Humedad				
Perúdic	-0.16575	0.42842	-0.38688	0.701
Régimen de Temperatura				
Isomésico	0.29095	0.53714	0.54166	0.591
Isotérmico	1.00229	0.23284	4.30459	0.000

Cuadro. 21. Coeficientes del Modelo de Regresión del Contenido de COS vs Temperatura, Precipitación y niveles de los factores Regímenes de Humedad y Temperatura

FUENTE DE VARIACIÓN	GL	S CAJUS	C MAJUS	F	P
Regresión	5	12.5890	2.51780	4.2814	0.003703
Temperatura Media (periodo)	1	0.3767	0.37669	0.6405	0.428763
Precipitación Media (periodo)	1	0.9122	0.91222	1.5512	0.221006
Régimen de Humedad	1	0.0880	0.08802	0.1497	0.701120
Régimen de Temperatura	2	12.1802	6.09008	10.3559	0.000280
Error	36	21.1709	0.58808		
Falta de Ajuste	1	0.0145	0.01446	0.0239	0.877992
Error Puro	35	21.1564	0.60447		
Total	41				

A continuación se muestran, para la respuesta original, los ajustes obtenidos en algunos de los valores con mayores errores residuales.

Cuadro. 22. Ajustes en valores con mayores errores residuales

Observación	COS (ton/ha)	Valor ajustado
16	5.135	30.491
23	171.051	281.833
24	481.896	281.833
25	22.125	84.510
30	364.775	84.510
31	53.122	80.635
32	117.945	80.635

Al analizar el modelo de regresión integralmente se observó que el coeficiente de determinación ($R^2 = 37.29\%$) es relativamente bajo, pero la prueba F, resultó significativa al 5% lo que sugiere que el modelo se ajusta a los datos. En la ecuación general, la temperatura resultó significativa en el régimen isotérmico pero no en el isométrico, mientras que el régimen de humedad no resultó significativo. Este resultado apunta hacia la importancia de la temperatura en la predicción de la cantidad de carbono en suelo.

Este modelo refleja la dependencia entre el comportamiento climático y los contenidos de COS en la región de estudio, pero queda algo impreciso la explicación de la significancia

de la temperatura y la no significancia de la humedad, por lo que se decidió utilizar un modelo alternativo.

(b) Modelo de Regresión lineal Mixto para la estimación de COS

En la literatura estadística estos modelos se refieren a situaciones donde se tienen covariables que están agrupadas en uno o más factores y la variable dependiente es continua, como es nuestro caso. Su denominación más general es “modelo de efectos mixtos” (que puede ser fijo y/o aleatorio). En esencia, los efectos fijos tienen influencia sólo en la media de la variable respuesta y son estimados a partir de los datos. Sin embargo, los efectos aleatorios influyen en la varianza de la variable respuesta y regulan su estructura de varianza y covarianza.

Para estimar los parámetros del modelo de regresión lineal mixto hemos utilizado el modelo de ZELIG denominado "ls.mixed" (Bailey and Alimadhi, 2007).

En el Cuadro 23 se muestran dos modelos: uno, tomando como factor aleatorio el régimen de humedad (columna izquierda de la tabla) y, otro, con factor aleatorio régimen de temperatura (columna derecha de la tabla). Puede observarse la similitud de ambos modelos, en lo que se refiere a los estadísticos de bondad de ajuste (AIC, BIC y deviance) y a los coeficientes del modelo para los efectos fijos y los coeficientes de correlación entre los predictores. No obstante en los efectos aleatorios, en el segundo modelo, el régimen de temperatura, muestra una varianza mayor que la del régimen de humedad en el primer modelo.

Este enfoque es capaz de explicar la importancia del régimen de temperatura y destaca que la predicción del COS en la zona de estudio no está distribuida de manera uniforme sino que depende de los factores climáticos temperatura y humedad y fundamentalmente del primero.

Es de suma importancia realizar estudios de este tipo para poder conocer más detalladamente la relevancia de la dependencia entre el comportamiento climático y la dinámica del carbono, que se refleja de forma directa en el incremento o disminución de los almacenes de COS.

El modelo de regresión lineal mixto permiten conocer en detalle la dependencia entre el comportamiento climático y los contenidos de COS en la región de estudio. Ellos reflejan cuan importantes son las condiciones ambientales para la dinámica del C en el suelo, tanto en su transformación como en su almacenamiento.

Cuadro. 23. Modelo de regresión lineal mixto en la estimación COS en suelos de Teziutlán según sus regímenes de Temperatura y Humedad.

COS ~ Temp + Precip + Humedad + RegTemp + tag(1 Humedad)				COS ~ Temp + Precip + Humedad + RegTemp + tag(1 RegTemp)							
AIC	BIC	desviación		AIC	BIC	desviación					
442	456	468		442	456	469					
Efectos aleatorios:				Efectos aleatorios:							
Nombre		Varianza	Des. Est.	Nombre		Varianza	Des. Est.				
Humedad (Intercepto)		560	23.7	RegTemp (Intercepto)		839	29.0				
Residual		4407	66.4	Residual		4407	66.4				
Número de observ.: 42, grupos: Humedad, 2				Número de observ.: 42, grupos: RegTemp, 3							
Efectos fijos:				Efectos fijos:							
	Estimado	ErrorEst.	Valor t		Estimado	ErrorEst.	Valor t				
(Intercepto)	-383.676	216.338	-1.774	(Intercepto)	-383.676	216.984	-1.768				
Temp	7.237	15.251	0.475	Temp	7.237	15.251	0.475				
Precip	1.407	0.461	3.049	Precip	1.407	0.461	3.049				
HumÚd	138.016	81.370	1.696	HumÚd	138.016	74.175	1.861				
RgTmpIs	132.492	54.421	2.435	RgTmpIs	132.492	68.122	1.945				
RgTmpTér	-124.005	90.933	-1.364	RgTmpTér	-124.005	99.738	-1.243				
Correlación de efectos fijos:				Correlación de efectos fijos:							
	Intr)	Temp	Precip	HumÚd	RgTmpI		(Intr)	Temp	Precip	HumÚd	RgTmpI
Temp	-0.814					Temp	-0.811				
Precip	-0.194	-0.361				Precip	-0.194	-0.361			
HumÚd	-0.360	-0.188	0.702			HumÚd	-0.359	-0.206	0.770		
RgTmpIs	0.369	-0.714	0.433	0.511		RgTmpIs	0.237	-0.570	0.346	0.448	
RgTmpTér	0.593	-0.812	0.192	0.377	0.831	RgTmpTér	0.500	-0.740	0.175	0.377	0.729

Finalmente, al relacionar las variables climáticas con la distribución de espacial de los COS se observó que el almacenamiento de COS, se concentra a temperaturas y precipitaciones aproximadas de entre 15.5 – 16 °C y de entre 120 a 280 mm anuales respectivamente (Fig 33 y 34).

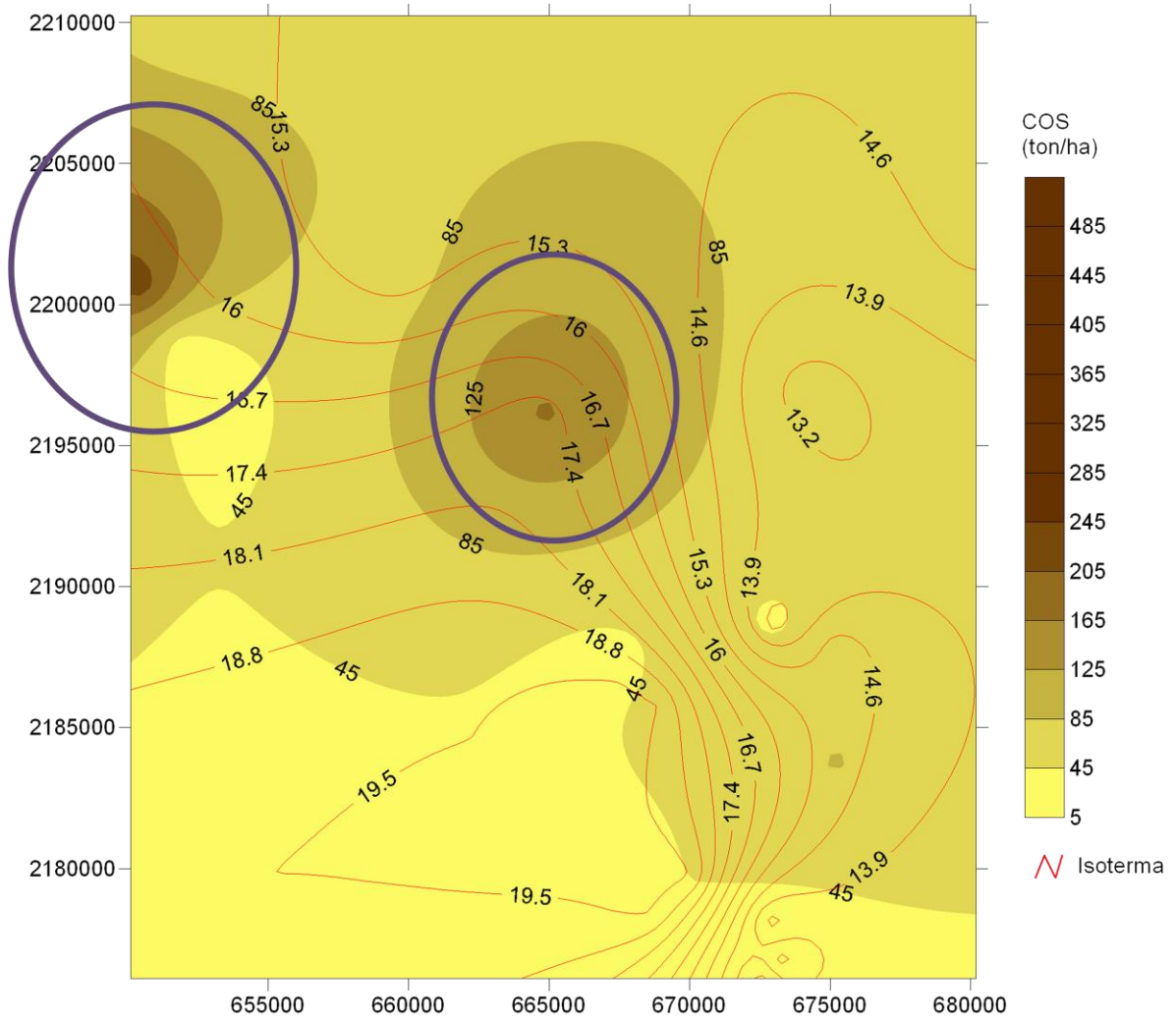


Fig. 33 Distribución espacial de los COS con referencia a las isotermas

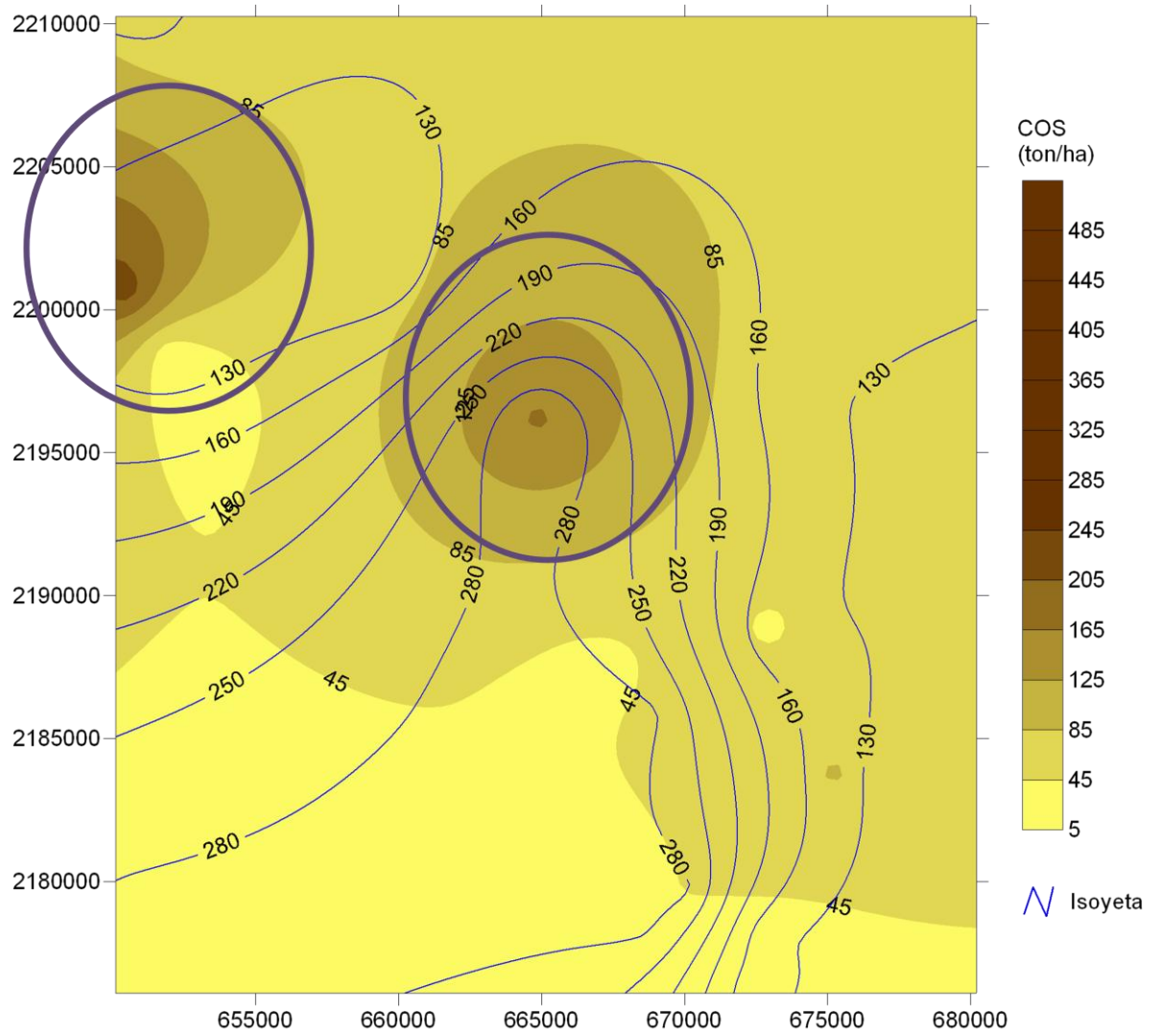


Fig. 34 Distribución espacial de los COS con referente a las isoyetas

IV.3 Establecimiento de las Bases de Datos y Exploración de los datos (Año 2009)

IV.3.1 Fisiografía de la Zona

Se tomaron muestras de suelos de sitios georeferenciados y se muestra a continuación un cuadro con las coordenadas correspondientes (Cuadro. 24.) y su ubicación geográfica en un mapa (Fig. 35).

Cuadro. 24. Coordenadas del sitio de muestreo

Perfil	X	Y
P30F	668698	2178367
P35F	673251	2176792
P36F	672518	2176075
Piñonero	669360	2169930
Yucca	669360	2169930

Estos sitios corresponden a Regosoles como suelos predominantes o principales, Andosoles húmicos y Litosoles como suelos secundarios, esto de acuerdo con la carta edafológica 1: 250 000 de INEGI.

De igual manera, se documentó la fisiografía de los sitios y se observó lo siguiente:

En el sitio P30F (Fig. 36) y P35F (Fig. 37), se presenta una fisiografía un poco de lomeríos aunque en su mayoría es planicie, donde se localiza Bosque de Encino - Aile y Pastizal en ecotono, lo cual nos hace pensar que ha habido un posible cambio de uso de suelo paulatino de forestal siendo el Bosque de Encino la vegetación clímax, seguido del Bosque de Aile que ahora representa el Bioma predominante que se observa pierde territorio frente el avance inminente del Pastizal (género *Mullenbergia*).

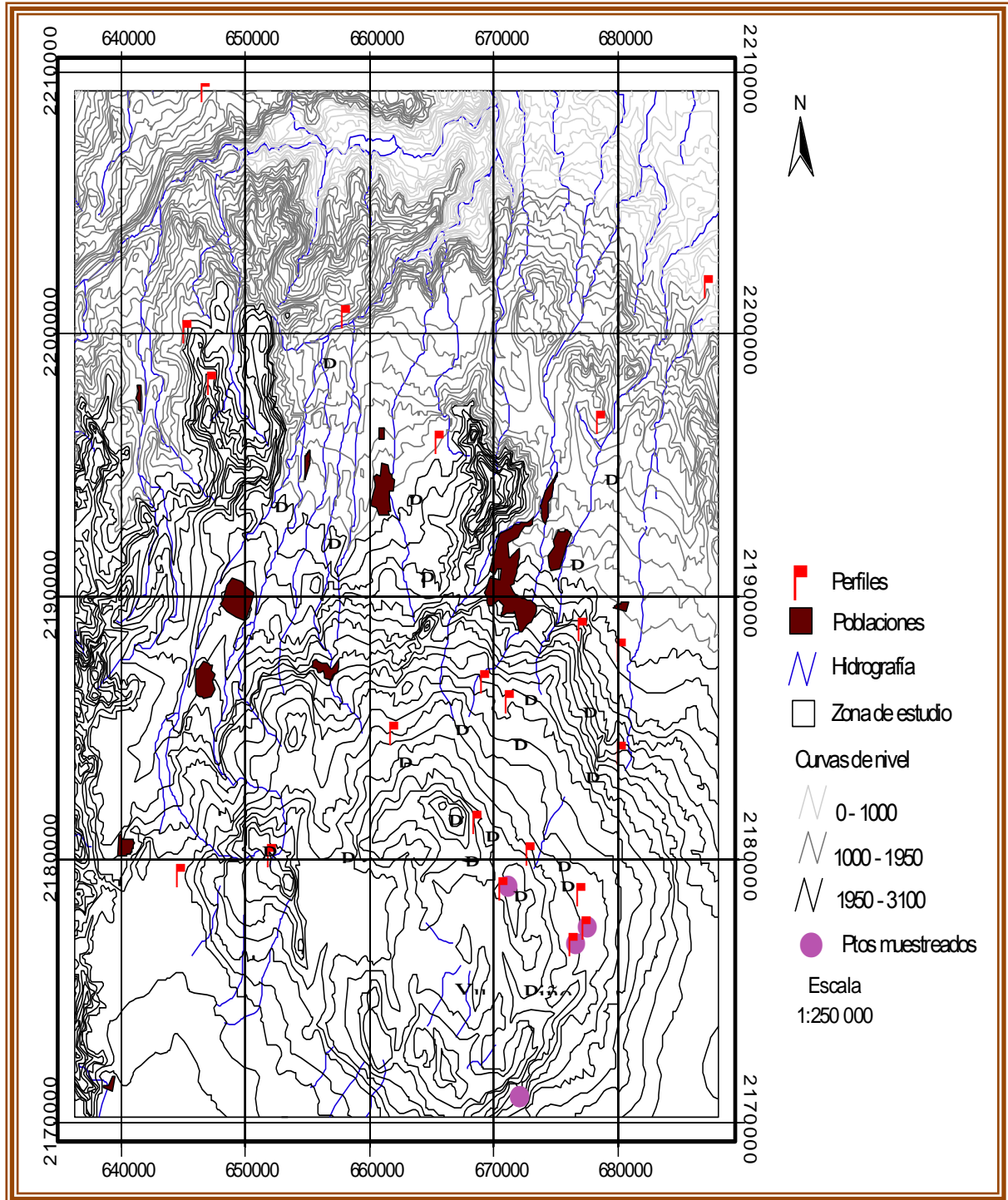


Fig. 35 Mapa de muestreo del proyecto



Fig. 36 Fisiografía del sitio P30F



Fig. 37 Fisiografía del sitio P35F

En el sitio P36F (Fig. 38), se presenta una fisiografía de lomerío que rodea a la planicie donde se tomaron las muestras, donde se ubica bosque de Pino (inducido en plantaciones) – Encino – Aile – Pino - Pastizal. Lo que nos hace pensar que la vegetación clímax del lugar es como en los casos anteriores, el Bosque de Encino que es desplazado por el de Aile, que a su vez es desplazado por el Pastizal, pero también se nota la presencia importante de plantaciones de pinos ya que se encontraron plantaciones de *Pinus pátula* en áreas concentradas cercanas al sitio de muestreo, lo que hace poner especial énfasis en el hecho de que se está incentivando la introducción de plantaciones comerciales de este tipo.



Fig. 38 Fisiografía del sitio P36F

En el sitio Piñonero (Fig. 39) y Yucca (Fig. 40), se presenta fisiografía de lomerío, donde se ubica un ecotono con especies de vegetación de selva baja caducifolia, esto es se intercalan el Bosque de Pino (piñonero) junto con la Yucca.

De especial interés es el hecho de la presencia peculiar de micelio de hongo en el horizonte orgánico del suelo en la zona donde se ubican los pinos piñoneros, lo que nos hace notar la especial adaptación que tiene esta zona debido a la simbiosis entre el piñón y el hongo.



Fig.39 Fisiografía del sitio Piñonero



Fig. 40 Fisiografía del sitio Yucca

IV.3.2 Descripción de los Horizontes Orgánicos del Suelo

Por otro lado, de las salidas de campo que se han podido realizar hasta el momento, se tiene la información de la descripción morfológica de los Horizontes Orgánicos de los sitios muestreados de acuerdo con la metodología propuesta por Brott *et al.* (2006), la cual se ha concentrado en bases de datos y se muestra a continuación.

Cuadro. 25. Descripción morfológica de los Horizontes Orgánicos

Perfil	Cobertura	Sec. Capas Org.	Formas de Humus	Mezcla y unión	Caract. Biolog
P30F	Bosque Aile – Encino - Pastizal	Olf – Ofl - A	Mull	Fisicoquímica	20 – 30%
P35F	Bosque Aile – Encino – Pastizal	Olf – Ofl -A Olf – A -	Mull	Fisicoquímica	30% 10% -
P36F	Bosque Pino – Encino - Aile – Pastizal	Olf - A	Mull	Fisicoquímica	10 – 20%
Piñonero	Pino Piñonero	Olf – Ofl – Ofh - A	Mull	Fisicoquímica	5%
Yucca	Matorral xerófilo	Olf – A	Mull	Fisicoquímica	< 2%

De la información anteriormente descrita se tienen fotografías de los horizontes orgánicos presentes en estos sitios y éstas se muestran enseguida.

Del sitio P30F (Fig. 41) se observa una distinción muy clara de las diferentes capas del horizonte orgánico en características como el color, de igual modo lo fue así con las texturas. También se nota la existencia de una capa Olf (capa orgánica de litter con residuos parcialmente fragmentado de color café) y una Ofl (capa orgánica fragmentada cuyo contenido de material orgánico fino es de entre 10 y <30%), seguidas del horizonte A (órgano – mineral), lo que da indicios de la actividad biológica existente en el suelo. De acuerdo con la secuencia anterior de capas orgánicas la forma de humus presente es la Mull. Es importante notar la cantidad, tamaño y longitud de raíces que se presentan, además que en la superficie puede verse una capa de vegetación rastrera.

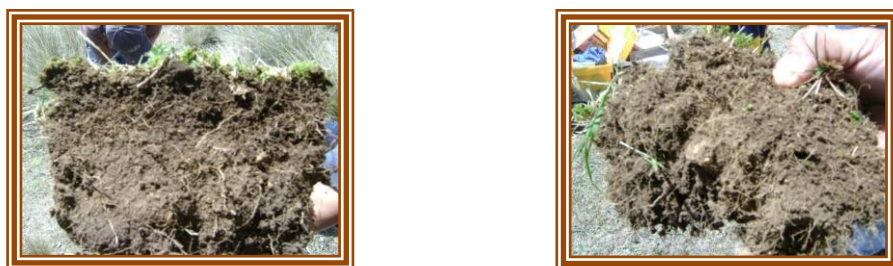


Fig. 41 Horizontes Orgánicos sitio P30F

Del sitio P35F se tomaron horizontes orgánicos en tres lugares, esto es al lado del macoyo, debajo del macoyo y lejos del macoyo, debido a que el sitio muestreado presentaba estas diferentes fases de localización del pasto. Del horizonte orgánico al lado del macoyo (Fig. 42), se nota la existencia de una capa Olf (capa orgánica de litter con residuos parcialmente fragmentado y de color café) y una capa Ofl (capa orgánica fragmentada cuyo contenido de material orgánico fino es de entre 10 y <30%), seguida del horizonte A (órgano – mineral), lo que da indicios de la actividad biológica existente en el suelo. De acuerdo con la secuencia anterior de capas orgánicas la forma de humus presente es la Mull. También se observa la influencia de raíces.



Fig. 42 Horizontes Orgánicos sitio P35F – al lado del macoyo

De los sitios debajo del macoyo (Fig. 42.1), se nota que en el horizonte orgánico existe una capa Olf (capa orgánica de litter con residuos parcialmente fragmentado y de color café), notándose que desaparece la capa Ofl, y que enseguida se presenta el horizonte A (órgano – mineral). De acuerdo con la secuencia anterior de capas orgánicas la forma de humus presente es la Mull. También se observa la sobresaliente influencia de raíces.



Fig. 42.1 Horizontes Orgánicos sitio P35F – debajo del macoyo

Del sitio muestreado lejos del macoyo de pasto (Fig. 42.2) se observa la ausencia del horizonte orgánico, esto es que se tiene en la superficie del suelo directamente el horizonte A (órgano-mineral), también se observa la existencia de vegetación rastrera como cobertura

en sitios localizados y que el litter casi desaparece pero se presenta aproximadamente en un 2% de la superficie.



Fig. 42.2 Horizontes Orgánicos sitio P35F – lejos del macoyo

En el sitio P36F (Fig. 43) se observó que se presenta una capa muy gruesa de litter en la superficie del suelo, aportado por el pinus pátula en su mayoría debido a que fue visible identificar las acículas del pino. Del horizonte orgánico se observó que existe una capa Olf (capa orgánica de litter con residuos parcialmente fragmentado y de color café), notándose que desaparece la capa Of1, y que enseguida se presenta el horizonte A (órgano – mineral). De acuerdo con la secuencia anterior de capas orgánicas la forma de humus presente es la Mull.



Fig. 43. Horizontes Orgánicos sitio P36F

En el sitio Piñonero se observó, como lo muestra la Fig. 44, que en el horizonte orgánico se presenta una capa Olf (capa orgánica de litter con residuos parcialmente fragmentado y de color café), una capa Of1 (capa orgánica fragmentada cuyo contenido de material orgánico fino es de entre 10 y <30%) y una capa Ofh (capa fragmentada cuyo contenido de material orgánico fino es de entre 30% y <70%), seguida del horizonte A (órgano – mineral). De vital importancia resulta la presencia de una capa muy densa de micelio de hongo en la última capa (Ofh), lo que nos puntualiza la alta actividad de hongos que se lleva a cabo en este sitio. De acuerdo con la secuencia de capas orgánicas la forma de humus presente es Mull.



Fig. 44 Horizontes Orgánicos sitio Piñonero

En el sitio Yucca es importante señalar que como es evidente en la Fig. 45 el horizonte orgánico no existen, debido a las características del tipo de vegetación que se soporta y las condiciones climáticas que se presentan.



Fig. 45 Ausencia de Horizontes Orgánicos sitio Yucca

IV.3.3 Propiedades del Suelo y Bases de Datos

IV.3.3.1 Densidad Aparente

Con lo que respecta a los análisis de laboratorio realizados, se tienen los datos de las densidades aparentes que se muestran en el Cuadro. 26.

De los datos obtenidos, se observa que las densidades por ser suelos orgánicos y volcánicos, se encuentran dentro del rango referido en la NOM-021-SEMARNAT-2000, donde los valores se reportan como menores de 1.00 g/cm^3 . Como sabemos la densidad aparente del suelo expresa el contenido de sólidos por unidad de volumen (g/cm^3), esta

propiedad está asociada a la textura del suelo, al igual que otras propiedades. Indica la compactación del suelo y es un indicador del grado de facilidad o dificultad que podría tener la raíz para penetrar el suelo y explorarlo. Mientras que en construcción civil se requiere un suelo con alta densidad aparente o compacto, en la agricultura se requiere un suelo esponjoso y no compacto para que provea un buen ambiente para el desarrollo del sistema radicular. Esta puede llegar a ser una limitante mayor en el suelo para que este exprese su todo potencial productivo (Castellanos *et al.*, 2000).

Cuadro. 26. Datos de Densidades Aparentes

Perfil	DA (g/cm ³)
P30F	0.35
P35F	0.55
P36F	0.53
Piñonero	0.75
Yucca	0.74

Con lo que respecta a los análisis de laboratorio realizados en las muestras de suelo, se generaron los datos de densidad aparente que se muestran en el Cuadro. 26., agregándose los de los Cuadros. 27., 28., 29. y 30., correspondientes al % Materia Orgánica, la estimación de los Contenidos de Carbono Orgánico en Suelos; el % Nitrógeno Total, la relación C/N; su Acidez Hidrolítica (pH agua) y Acidez Intercambiable (pH KCl), ΔpH; finalmente Carbonatos y Bicarbonatos.

De los datos de densidad (Cuadro. 26.), se observa que por ser suelos orgánicos y volcánicos, se encuentran dentro del rango referido por la NOM-021-SEMARNAT-2000, donde los valores se reportan como menores de 1.00 g/cm³.

La densidad aparente del suelo es una propiedad que expresa el contenido de sólidos por unidad de volumen (g/cm³), y se asocia a la textura del suelo, al igual que otras propiedades. Así mismo, informa sobre la compactación que pueda existir en el suelo y permite también inferir acerca de la circulación del agua, en el sentido que valores bajos ocasionan propiedades edáficas más favorables (Pajares *et al.*, 2005).

Arteaga y Moreno (2006) reportan valores de densidades aparentes similares (0.72 y 0.97 g/cm³) para Andosoles en el Estado de México con cobertura de Bosque de Pino y Bosque de Oyamel respectivamente, por lo que se ratifica el hecho de que los Andosoles forestales presentan valores de densidades aparentes menores a 1 g/cm³. Por otra parte, Pajares *et al.* (2005) y Vela *et al.* (2007), reportan valores parecidos para Andosoles forestales también del Estado de México (Volcán del Tláloc) y de las faldas del Volcán de la Malinche respectivamente. El primer conjunto de autores mencionan la presencia de una asociación de Bosque de Pino-Encino y de una vegetación de pastizal, refiriendo que estos suelos forestales presentan una porosidad más elevada con respecto a los demás suelos mencionados en dicho trabajo. Los segundos autores hacen referencia a un Bosque de Pino considerado como de regeneración, cuyos bajos valores de densidad aparente presentes en

los horizontes superficiales se deben a la presencia de materiales de origen orgánico y de componentes no cristalinos (Besoain *et al.*, 2000).

También Pérez *et al.* (2009) reporta valores similares para Andosoles con vegetación de bosque de *Pinus spp.* y pastizal subalpino en la zona del volcán El Pelado en el Distrito Federal, donde la densidad aparente en ese caso aumenta a causa de la combustión ejercida sobre la materia orgánica por acción de los incendios forestales, lo cual se considera puede afectar la estructura del suelo, debido a que de forma particular, los suelos que han estado sujetos al impacto del fuego son más susceptibles a la desagregación, reduciendo así su macro porosidad y formando huecos que pueden ser rellenados por las partículas del suelo y cenizas, incrementándose entonces la densidad aparente (Mallik *et al.*, 1984).

IV.3.3.2 Materia Orgánica

Refiriéndonos a los datos de porcentaje de materia orgánica del suelo, se nota en el Cuadro 27., que de manera generalizada los valores oscilan entre 3.11 y 47.93, por lo que se clasifican desde concentraciones muy bajas (aquellos cuyo valor es <4.0) hasta de concentraciones muy altas (cuyo valor es >16.1), esto para suelos volcánicos según la NOM-021-SEMARNAT-2000. De acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) se clasifican como Andosoles desde bajo (2.1 – 3.5) hasta muy alto (>15.1) contenido de materia orgánica.

La materia orgánica del suelo tiene importantes efectos sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas, además, es un parámetro muy importante en la clasificación taxonómica de los suelos. En la mayoría de los suelos, el contenido de materia orgánica decrece al ir aumentando la profundidad del mismo; y de igual forma existe una relación general entre la altitud y el contenido de materia orgánica del suelo: a > altitud > contenido orgánico, por lo que las distorsiones más importantes a este comportamiento las presentan suelos derivados de depósitos sedimentarios, suelos con horizontes A enterrados y suelos con horizontes iluviales de materia orgánica (Jaramillo, 2002).

Quantín (1988) reporta valores de materia orgánica de 16.3 y 1.5 en campo, de 84 y 8.91 en laboratorio (como parámetros de referencia), de 19.91, 2.12, 1.3 y 3.71 (muestras problema), para horizontes A y B de un Andosol, cuya cobertura vegetal corresponde a barbecho y arbustos ubicado en el Cofre de Perote en Veracruz.

Avilés *et al.* (2007), da a conocer valores de materia orgánica en suelos que oscilan de entre 8.9 y 42.2, cuya cubierta vegetal presente corresponde a una selva perennifolia en el estado de Campeche, donde al relacionar la materia orgánica con la fracción fina del suelo se observó que a pesar de la alta correlación entre las variables, el porcentaje de explicación de la variación de la materia orgánica fue muy baja, lo que se atribuyó a que no se consideró adecuadamente el efecto que tenía el tipo de suelo sobre la acumulación de los materiales orgánicos edáficos.

De igual forma, Arteaga y Moreno (2006) reporta datos de materia orgánica de 8.11 y 5.08 para Andosoles en el Estado de México con cobertura de Bosque de Pino y Bosque de Oyamel respectivamente. Donde se señala que este último es el que presenta mayor

profundidad en las primeras capas del perfil además de la mayor incorporación de materia orgánica, lo que se relaciona con la alta actividad fungosa en el mantillo forestal.

Por otra parte, Ángeles (2010) reporta valores de materia orgánica en horizontes superficiales para Andosoles con una cubierta forestal de Bosque de Oyamel, y de A. Religiosa del Parque Nacional El Chico en el estado de Hidalgo, de 24.27 y 31.31 respectivamente, cabe aclarar que estos sitios fueron afectados por incendios, y para cuyo caso el incremento de la materia orgánica en sitios afectados por incendios se atribuye a la adición de cenizas derivadas de la combustión del material vegetal, lo cual a su vez incrementó el pH del suelo.

Así mismo Pérez *et al.* (2009) reporta valores de materia orgánica para Andosoles con vegetación de bosque de *Pinus spp.* Y pastizal subalpino en la zona del volcán El Pelado en el Distrito Federal que oscila entre 14.95 y 21.86, en cuyo caso el carbono orgánico total se incrementó en menor medida, como consecuencia de que el incendio forestal ocurrido en esa zona fue menos intenso, mientras que hubo un decremento de carbono orgánico, donde el incendio alcanzó una mayor temperatura.

Por todo lo anterior, observamos que los valores obtenidos en la zona estudiada en este trabajo, presentan una variabilidad bastante amplia e incluso comparable con algunos de los sitios reportados por otros autores.

De los datos estimados de los contenidos de Carbono Orgánico en Suelos (COS) se observa una variación de entre 9.95 y 462.16 ton/ha. Lo que nos hace notar la diversidad de condiciones de almacenamiento de carbono que se presentan en los sitios, además, de que sabemos que la formación de complejos órgano-minerales protege la materia orgánica de la descomposición; este efecto es muy marcado en los Andosoles, debido a la presencia de materiales no cristalinos en la fracción arcilla, los cuales forman complejos sumamente estables con la materia orgánica, propiciando su acumulación al reducir drásticamente su mineralización (Jaramillo, 2002).

A nivel internacional, Rodríguez *et al.* (2004) señala que en más de la mitad de los Andosoles que cubren la superficie del Parque Nacional de Garajonay en España, se presenta un contenido en carbono orgánico total en los primeros 30 – 40 cm, que oscila entre 150 y 200 ton/ha. Por lo anterior vemos que nuestros suelos presentan valores en un intervalo de variación bastante más amplio que los reportados por ellos.

Para futuras investigaciones sería importante tener en cuenta el tipo de materiales orgánicos que se acumulan en el suelo, lo anterior de acuerdo con Brady y Weil, citados por Cabrera (2000), que agrupan los materiales orgánicos que se acumulan en el suelo, según el tipo de carbono que poseen, en: carbono activo, carbono lento y carbono pasivo. Los cuales se explican a continuación.

Carbono activo: Materia orgánica de alta calidad y fácilmente degradable. Está compuesta por la biomasa microbial, los metabolitos libres, por otras sustancias no húmicas y por los ácidos fúlvicos lábiles. Representan entre 10 y 20% de la materia orgánica del suelo y tienen una razón de recambio de 1.5 años aproximadamente.

Carbono lento: Es una materia orgánica de menor calidad y de mayor dificultad para ser degradada. Está representado por tejidos vegetales finamente divididos, ricos en lignina. Tiene tasas de recambio de entre 15 y 100 años.

Carbono pasivo: Compuesto principalmente por el humus formando complejos con las arcillas, por los ácidos húmicos y por las huminas. Tiene tasas de recambio de entre 500 y 5000 años y representa entre el 60 y el 90% de la materia orgánica total del suelo.

Cuadro. 27. Datos de Carbono Orgánico en suelo

Muestra	Horizonte	% MO	COS (ton/ha)
P30F1	A	30.50	30.96
P30F2	A	45.75	46.44
P30F3	A	39.21	39.80
P30F4	A	47.93	48.65
P30F5	A	9.80	9.95
P30F1	B	20.70	231.08
P30F2	B	22.87	255.41
P30F3	B	18.52	206.76
P30F4	B	25.05	279.73
P30F5	B	41.39	462.16
P35F	A	10.89	26.79
P35F1	A	9.80	24.11
P35F2	A	13.07	32.15
P35F3	A	11.44	28.13
P35F4	A	13.62	33.49
P35F5	A	13.62	33.49
P35F	B	4.36	89.74
P35F1	B	5.45	112.18
P35F2	B	4.90	100.96
P35F3	B	5.17	106.57
P35F4	B	4.36	89.74
P35F5	B	7.08	145.83
P36F1	A	17.43	66.72
P36F2	A	30.50	116.76
P36F3	A	43.57	166.80
P36F4	A	17.43	66.72
P36F5	A	33.77	129.27
P36F1	B	3.11	23.78

P36F2	B	4.14	31.71
P36F3	B	5.69	43.60
P36F4	B	3.11	23.78
P36F5	B	6.21	47.57
PiñoneroF1	A	7.25	31.53
PiñoneroF2	A	7.25	31.53
PiñoneroF3	A	3.11	13.51
PiñoneroF4	A	13.46	58.56
PiñoneroF5	A	19.67	85.59
YuccaF1	A	4.66	20.00
YuccaF2	A	3.62	15.56
YuccaF3	A	3.88	16.67
YuccaF4	A	6.21	26.67
YuccaF5	A	3.88	16.67

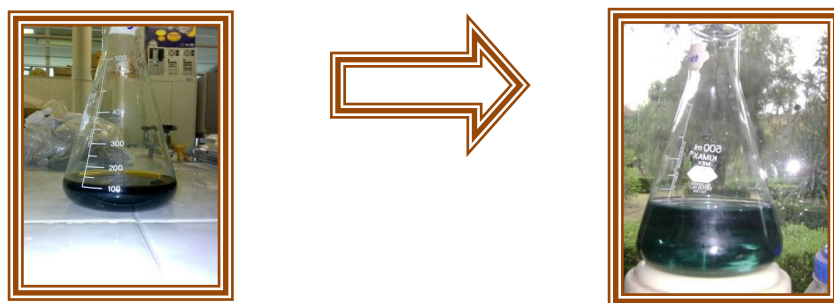


Fig. 46. Ejemplo de coloración de muestra antes y después de valoración de Materia Orgánica.

IV.3.3.3 Nitrógeno Total

De los datos de % Nitrógeno Total que se muestran en el Cuadro. 28., se observa que estos varían de entre 0.09 y 1.83.

Por su parte, Ángeles (2010) reporta valores de nitrógeno total en horizontes superficiales para los Andisoles estudiados en el Parque Nacional El Chico en el estado de Hidalgo, de 0.31 y 0.66 respectivamente, donde los valores bajos de nitrógeno se relacionan directamente a la presencia de altas temperaturas provenientes de los incendios forestales, lo cual provoca una mayor volatilización de este elemento.

Quantin (1988) reporta valores que oscilan entre 0.78 y 6.09 para horizontes A y B de un Andosol de la zona del Cofre de Perote en Veracruz, por lo cual se observó que la provisión de nitrógeno total, esencialmente de tipo orgánico, era muy elevada; sin embargo se

ignoraba cuál era la proporción de nitrógeno rápidamente mineralizable y disponible para las plantas. Por su parte Arteaga y Moreno (2006) reporta datos de 0.5 y 0.15 para Andosoles forestales en el Estado de México.

De lo anterior, se observa que los datos que aquí se proporcionan tienen una variabilidad semejante a los reportados para suelos del mismo tipo en el País.

La relación C/N presenta una variación de entre 31.32 y 15.19, debido a los elevados valores se nos refiere un buen proceso de mineralización de la materia orgánica.

A este respecto Quantin (1988) reporta valores que varían de 13.8 y 11.4 para suelos de referencia (como propiedad medida en campo), y de 11.2 a 12.6 en los suelos objeto de estudio, esto para horizontes A y B de un Andosol en Veracruz, donde refiere que estos valores indican una buena mineralización y humificación de la materia orgánica y que la acumulación de humus está restringida al horizonte húmico cerca de la superficie, donde la provisión de carbono y de nitrógeno orgánico es muy elevada.

Pajares *et al.* (2005) reporta valores de 14.1 y 16.6 para una región del Estado de México, donde el valor reportado para el bosque de Pino-Encino es bastante alto, esto debido a la elevada acumulación de compuestos orgánicos. Por el contrario, el valor más bajo de dicha relación se debió a una mayor mineralización del C respecto al N en correspondencia a las condiciones climáticas que en algunos sitios se presentaron. Finalmente Arteaga y Moreno (2006) reporta datos de C/N de 16.22 y 33.9.

Esta relación es un importante indicador de la calidad del suelo (Bauder, 1999). Este parámetro se relaciona linealmente con la mineralización de los materiales orgánicos, entendiendo por mineralización las transformaciones del nitrógeno orgánico, hasta que es liberado en la forma de NH_3 , (Orozco, 1999). De igual modo nos da una idea de la forma como se presentan los procesos de oxidación – reducción. Hasta hace poco tiempo se aceptaba que esta relación controlaba la actividad de los microorganismos y la facilidad con que se puede descomponer la materia orgánica que se le aporta al suelo, teniendo como límites críticos los siguientes valores, tomados de Orozco (1984): $\text{C/N} \approx 10$ representa la presencia de un proceso de descomposición fácil y una $\text{C/N} > 30$ representa un proceso de descomposición difícil; por lo que de acuerdo a este criterio en los suelos de estudio se presenta en su mayoría condiciones de un proceso difícil de descomposición del material vegetal por lo que el carbono orgánico se acumula fácilmente en los suelos, lo cual ratifica los elevados contenidos de COS referidos en el Cuadro. 27.

Cuadro. 28. Datos de Nitrógeno en suelo y su relación C/N

Muestra	Horizonte	% N Total	C/N
P30F1	A	1.30	13.60
P30F2	A	1.75	15.12
P30F3	A	0.95	23.87
P30F4	A	1.83	15.19
P30F5	A	0.38	15.04
P30F1	B	0.30	39.68
P30F2	B	0.51	25.80
P30F3	B	0.33	33.02
P30F4	B	0.51	28.67
P30F5	B	1.70	14.11
P35F	A	0.23	27.84
P35F1	A	0.27	20.88
P35F2	A	0.29	26.38
P35F3	A	0.42	15.66
P35F4	A	0.39	20.08
P35F5	A	0.22	36.00
P35F	B	0.12	20.88
P35F1	B	0.17	18.98
P35F2	B	0.09	31.32
P35F3	B	0.13	23.34
P35F4	B	0.19	13.36
P35F5	B	0.14	28.58
P36F1	A	0.40	25.22
P36F2	A	0.51	34.91
P36F3	A	0.91	27.84
P36F4	A	0.36	28.44
P36F5	A	0.51	38.08
P36F1	B	0.15	11.91
P36F2	B	0.17	13.81
P36F3	B	0.10	33.59
P36F4	B	0.16	11.34
P36F5	B	0.20	17.65
PiñoneroF1	A	0.23	18.53
PiñoneroF2	A	0.18	23.16
PiñoneroF3	A	0.20	8.82
PiñoneroF4	A	0.40	19.48

PiñoneroF5	A	0.53	21.71
YuccaF1	A	0.24	11.17
YuccaF2	A	0.14	14.63
YuccaF3	A	0.32	7.09
YuccaF4	A	0.17	20.71
YuccaF5	A	0.18	12.41



Fig. 47 Ejemplo de coloración de muestra antes y después de valoración de % Nitrógeno Total

IV.3.3.4 Acidez Hidrolítica e Intercambiable

De los datos correspondientes a acidez, se observa que los de acidez hidrolítica (pH agua) varían de entre 4.30 y 5.85 por lo que clasifican de fuertemente ácidos (aquellos cuyo valor se encuentran < 5.00) a moderadamente ácidos (aquellos cuyo valor se encuentren entre 5.1 – 6.5) respectivamente de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 y de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) se clasifica también desde extremadamente ácidos a moderadamente ácidos.

Alvear *et al.* (2007) reporta valores de pH para Andosoles de la Región de la Araucanía en Chile de 5.0 y 5.4 para un bosque secundario y un bosque maduro respectivamente, por lo que se muestra que ambos sistemas poseen suelos ácidos a moderadamente ácidos, con una alta capacidad de intercambio catiónico.

Ángeles (2010) reporta valores de 5.75 y 5.69 para Andosoles superficiales, donde los pH elevados se atribuyen a la deposición de cenizas producto de los incendios forestales.

Quantin (1988) reporta valores de 6.5 y 6.1 para suelos de referencia, y de 5.5 a 6.7 para suelos de estudio, reportado para horizontes superficiales, donde el pH es ligeramente ácido evidenciando que este tipo de suelo es rico en alófono (con cargas variables) con respecto a los paleosuelos estudiados en el mismo trabajo que son ricos en minerales arcillosos (con cargas permanentes).

Pajares *et al.* (2005) lo hace con valores de 5.0 y 6.3 y señala además que la degradación del bosque lleva a una acidificación en el suelo (Covaleda *et al.*; 2004); por su parte Avilés *et al.* (2007) da valores que oscilan entre menores de 5.5 hasta 6.0; de igual manera se reportan valores de 6.18 y 6.44; y Pérez *et al.* (2007) menciona valores de 6.5 y 6.7.

Podemos observar que de manera generalizada son suelos ácidos y que encajan con los valores que aquí se presentan.

De la acidez intercambiable (pH KCl) se nota que los valores se presentan entre 4.26 a 5.33, por lo que se clasifican de igual modo de fuertemente ácidos (aquellos cuyo valor se encuentran < 5.00) a moderadamente ácidos (aquellos cuyo valor se encuentren entre 5.1 – 6.5) respectivamente de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 y de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) se clasifican desde fuertemente ácidos a moderadamente ácidos. Sin embargo, una fuerte diferencia entre pH (H₂O) y pH (KCl) indica que existen importantes cargas permanentes, debido a los ácidos orgánicos cerca de la superficie o las arcillas más en profundidad (Quantin, 1988).

Con relación al delta pH los valores presentan un signo negativo, lo que hace referencia a que en el suelo predomina este tipo de carga y es intercambiador catiónico en lugar de ser un intercambiador neto de aniones (Jaramillo, 2002).

La capacidad buffer del suelo es la resistencia del suelo a cambiar el pH al adicionarle ácidos o bases, dentro de un determinado rango de valores de pH; esta capacidad es de especial magnitud en Andosoles (Jaramillo, 2002). Espinosa (1994) sostiene que en los Andosoles se presenta una alta capacidad buffer debido a la alta superficie reactiva que poseen sus coloides.

Cuadro. 29. Datos de pH en suelo

Muestra	Horizonte	AH	AI	ΔpH
P30F1	A	5.02	4.90	-0.12
P30F2	A	4.98	4.76	-0.22
P30F3	A	5.01	4.73	-0.28
P30F4	A	4.68	4.39	-0.29
P30F5	A	5.79	5.37	-0.42
P30F1	B	4.80	4.73	-0.07
P30F2	B	4.41	4.39	-0.02
P30F3	B	4.60	4.57	-0.03
P30F4	B	4.30	4.26	-0.04
P30F5	B	5.15	5.06	-0.09
P35F	A	5.55	5.27	-0.28
P35F1	A	5.27	5.26	--0.01
P35F2	A	5.51	5.18	-0.33
P35F3	A	5.50	5.12	-0.38

P35F4	A	5.52	5.18	-0.34
P35F5	A	5.21	5.16	-0.05
P35F	B	5.70	5.48	-0.22
P35F1	B	5.75	5.46	-0.29
P35F2	B	5.80	5.65	-0.15
P35F3	B	5.76	5.60	-0.16
P35F4	B	5.79	5.58	-0.21
P35F5	B	5.80	5.53	-0.27
P36F1	A	5.28	4.84	-0.44
P36F2	A	4.93	4.61	-0.32
P36F3	A	4.30	4.13	-0.17
P36F4	A	5.37	5.13	-0.24
P36F5	A	4.70	4.30	-0.40
P36F1	B	5.34	5.20	-0.14
P36F2	B	5.16	5.06	-0.10
P36F3	B	5.10	4.87	-0.23
P36F4	B	5.85	5.33	-0.52
P36F5	B	4.93	4.88	-0.05
PiñoneroF1	A	5.31	5.14	-0.17
PiñoneroF2	A	5.33	5.16	-0.17
PiñoneroF3	A	5.61	5.43	-0.18
PiñoneroF4	A	5.20	4.98	-0.22
PiñoneroF5	A	5.13	5.04	-0.09
YuccaF1	A	5.62	5.52	-0.10
YuccaF2	A	5.60	5.51	-0.09
YuccaF3	A	5.77	5.63	-0.14
YuccaF4	A	5.52	5.40	-0.12
YuccaF5	A	5.60	5.32	-0.28



Fig. 48. Ejemplo de valoración de Acidez Hidrolítica

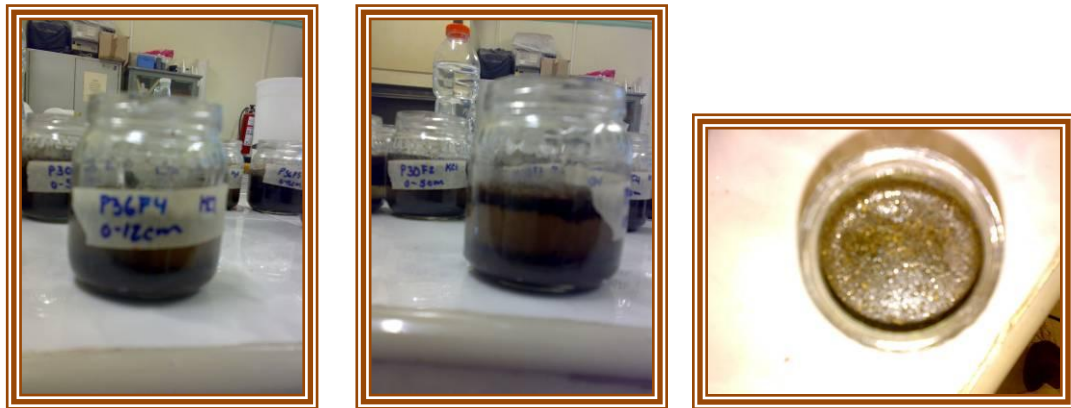


Fig. 49. Ejemplo de valoración de Acidez Intercambiable

IV.3.3.5 Carbonatos y Bicarbonatos

De los carbonatos y bicarbonatos que se observan en el Cuadro. 30., los valores de carbonatos en las muestras de Piñonero y Yucca fueron mínimos o despreciables de modo que al agregar el indicador (fenoftaleína) no presentaron vire alguno, por lo que se considera que su presencia es en una muy baja concentración o despreciable que no pudo cuantificarse, por otro lado con lo que respecta a los bicarbonatos se encuentran presentes entre 1.00 y 1.80 meq/100g de muestra.

La dureza o presencia de carbonatos y bicarbonatos en el suelo se lleva a cabo por acción del arrastre de iones por el agua y estos se depositan en el suelo. El agua de lluvia al caer no es suficiente para disolver las excesivas cantidades de sólidos de que existen en muchas aguas naturales. La capacidad disolvente se obtiene del suelo, donde la acción bacteriana libera dióxido de carbono. El agua del suelo queda muy cargada de dióxido de carbono, el cual, desde luego esta en equilibrio con el ácido carbónico. Las condiciones de bajo pH inducidas por el dióxido de carbono disuelven los materiales básicos, especialmente las formaciones de piedra caliza. Ya que la lluvia al entrar en contacto con la superficie del suelo ya que esta es una zona de intensa acción bacteriana se producen grandes cantidades de CO_2 que forma ácido carbónico al estar en contacto con el agua, él cual presenta alguna acción sobre los compuestos básicos presentes en el suelo, por su parte en el subsuelo que es una zona de menos actividad microbiana también existe CO_2 aunque en menores cantidades, por lo que también hay lugar a una acción continuada sobre los compuestos básicos presentes formando bicarbonatos y carbonatos en el suelo. Y por último y no menos importante es la formación de estos compuestos por intensa acción química de las reacciones que se presentan en los materiales parentales característicamente en las piedras calizas (Sawyer *et al.*, 2000).

Cuadro. 30. Datos de Carbonatos y Bicarbonatos en suelo

Muestra	Horizonte	$\text{CO}_3^{=}$	HCO_3^-
PiñoneroF1	A	-	1.20
PiñoneroF2	A	-	1.20
PiñoneroF3	A	-	1.00
PiñoneroF4	A	-	1.20
PiñoneroF5	A	-	1.80
YuccaF1	A	-	1.40
YuccaF2	A	-	1.20
YuccaF3	A	-	1.20
YuccaF4	A	-	1.60
YuccaF5	A	-	1.40

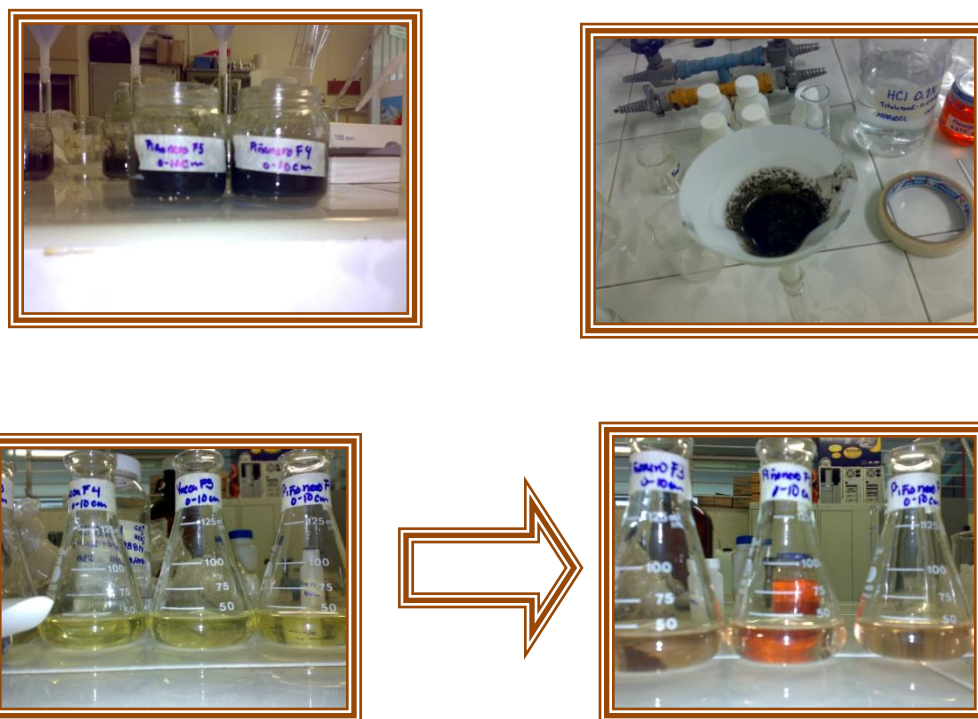


Fig. 50. Ejemplo de valoración de Carbonatos y bicarbonatos

IV. 3.4 Análisis de Datos a través de la Regresión Polinomial

Para el análisis estadístico de los datos se ha usado un procedimiento de regresión lineal, se tomó como variable respuesta los contenidos de Carbono Orgánico del Suelo (“Y”), dicha variable tuvo que someterse a una transformación para lograr así cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de los datos.

El coeficiente de determinación (R^2) obtenido resultó ser relativamente bajo, a decir de 37.29%, a diferencia de la prueba F que resultó significativa con un 5% de error. Posteriormente al ajustar el modelo a los datos se observó que de las variables involucradas en el análisis, el régimen de Temperatura resultó ser una variable significativa a diferencia del régimen de humedad, la precipitación media anual y la temperatura media anual que resultaron no serlo. Se obtuvieron las ecuaciones de regresión para cada combinación de regímenes de humedad y temperatura presentes.

Cuadro 31. Temperatura y precipitación para las estaciones del periodo C

Estación	Temperatura	Precipitación	Régimen Humedad	Régimen Térmico
Oyameles	15.5	56.0	Ústico	Isomésico
Teziutlán	16.5	124.7	Údico	Isotérmico
Jalacingo	15.6	137.4	Údico	Isotérmico
Acajete	15.3	951.1	Ústico	Isotérmico
Altotonga	14.8	1469.8	Údico	Isomésico
Las Minas	17.6	1528.8	Údico	Isotérmico
Perote	12.7	526.4	Arídico y Tórrico	Isomésico
Alchichica	12.7	398.9	Arídico y Tórrico	Isomésico

Análisis General de Regresión: lnCOS versus DA, NT, RelaciónCN, AH, AI,

Cuadro. 32. Ecuaciones de regresión para ln COS vs propiedades del suelo

Régimen	Ecuación
Údico-isotérmico	$\ln\text{COS} = 0.226753 + 0.145058 \text{ DA} + 0.0587374 \text{ NT} + 0.0040428 \text{ Relación CN} + 0.0447859 \text{ AH} - 0.059335 \text{ AI} + 0.156251 \text{ DeltapH}$
Ústico-isomésico	$\ln\text{COS} = -0.295164 + 0.145058 \text{ DA} + 0.0587374 \text{ NT} + 0.0040428 \text{ Relación CN} + 0.0447859 \text{ AH} - 0.059335 \text{ AI} + 0.156251 \text{ DeltapH}$

Cuadro. 33. Coeficientes de la regresión

Término	Coef.	Coef. Error Est.	t	p
Constante	-0.260958	0.174004	-1.49973	0.143
DA	0.145058	0.130009	1.11575	0.272
NT	0.058737	0.029362	2.00047	0.053
RELACION C/N	0.004043	0.001238	3.26607	0.002
AH	0.044786	0.050773	0.88208	0.384
AI	-0.059335	0.052981	-1.11992	0.271
DELTA Ph RÉGIMEN ÚDICO - ISOTÉRMICO	0.156251	0.071792	2.17645	0.037
	0.034206	0.018889	1.81086	0.079

Cuadro. 34. Estadísticos del Modelo

S = 0.0472871
R ² = 55.08%
R ² (ajustado) = 45.83%

Cuadro. 35. Análisis de Varianza

Término	G.L.	Suma Cuadrados Ajustado	Media Cuadrada ajustada	F	p
Regresión	7	0.0932093	0.0133156	5.9549	0.000143
DA	1	0.0027837	0.0027837	1.2449	0.272352
NT	1	0.0089485	0.0089485	4.0019	0.053487
Relación C/N	1	0.0238527	0.0238527	10.6672	0.002493
AH	1	0.0017398	0.0017398	0.7781	0.383928
AI	1	0.0028045	0.0028045	1.2542	0.270597
Delpa pH	1	0.0105921	0.0105921	4.7369	0.036562
Clima	1	0.0073326	0.0073326	3.2792	0.079006
Error	34	0.0760265	0.0022361		
Total	41				

Cuadro. 36. Ajuste y diagnóstico para observaciones inusuales

Observ.	BoxCox1	Ajuste	Error² del ajuste	Residual	Residuo Estand.
5	-0.317008	-0.217927	0.0290243	-0.099081	-2.65405 R
16	-0.172811	-0.072076	0.0203766	-0.100735	-2.36070 R

El gráfico residual de la transformación de COS, esto es $\ln \text{COS}$, puede observarse en el ANEXO V.

IV. 3.5 Distribución Espacial del COS

Finalmente al relacionar las variables climáticas con la distribución de espacial de los COS en 2009, como se observa en la Fig. 51 las mayores concentraciones de almacenamiento del COS oscilan entre las 157 y 164 ton/ha, y se concentra a temperaturas y precipitaciones aproximadas de entre 14.7 – 14.9 °C y de entre 1300 a 1450 mm anuales respectivamente (Fig. 52 y 53).

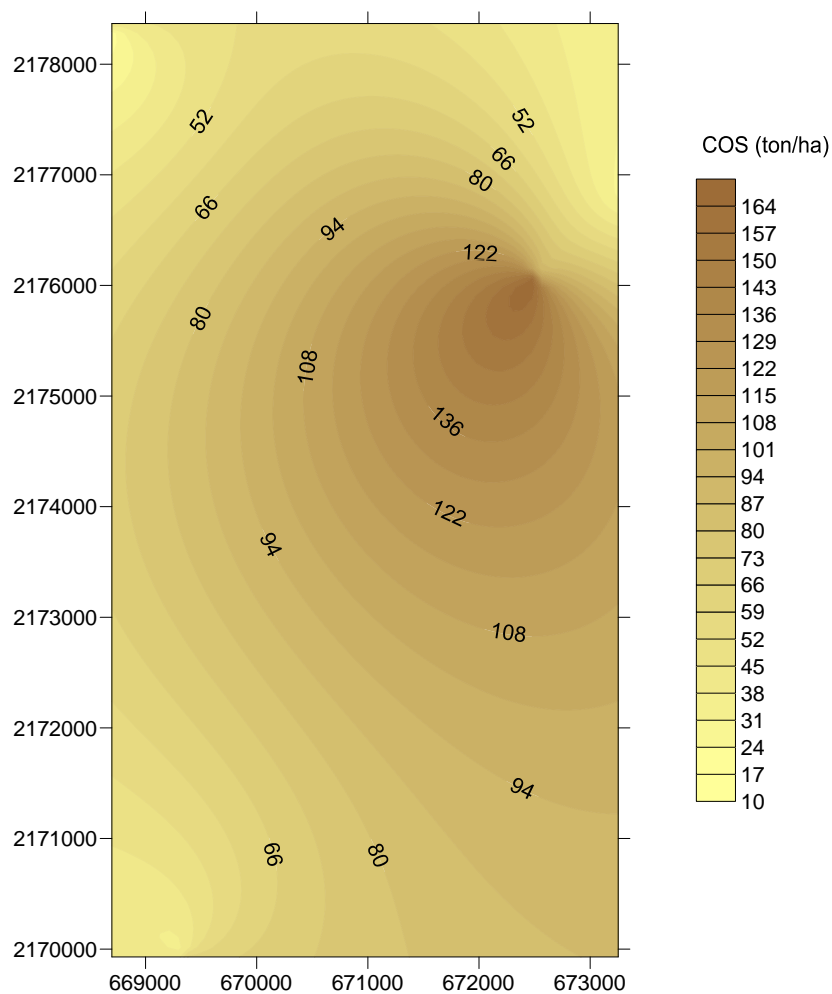


Fig. 51 Mapa de distribución espacial del COS (2009)

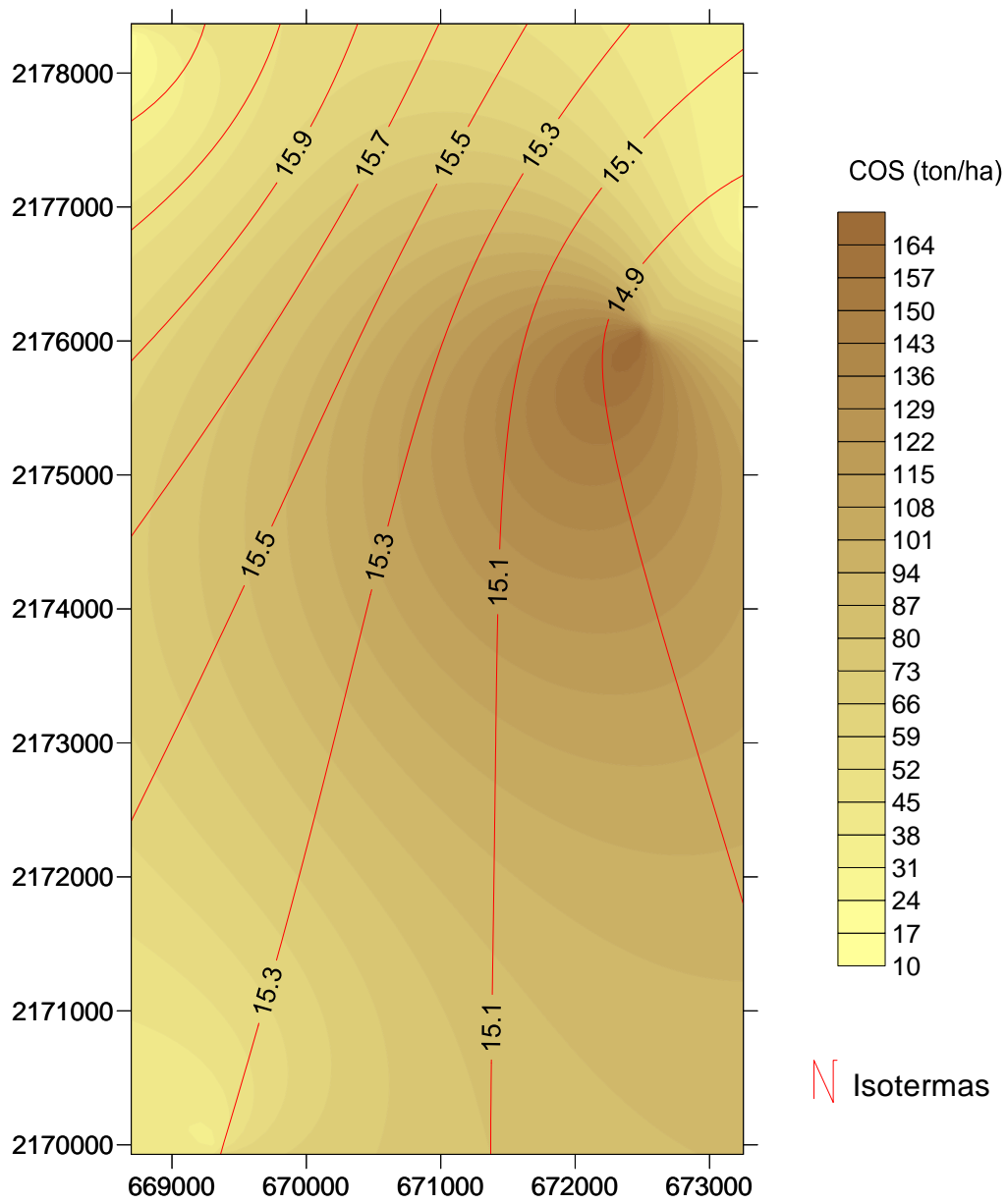


Fig. 52 Distribución espacial de los COS con referencia a las isotermas

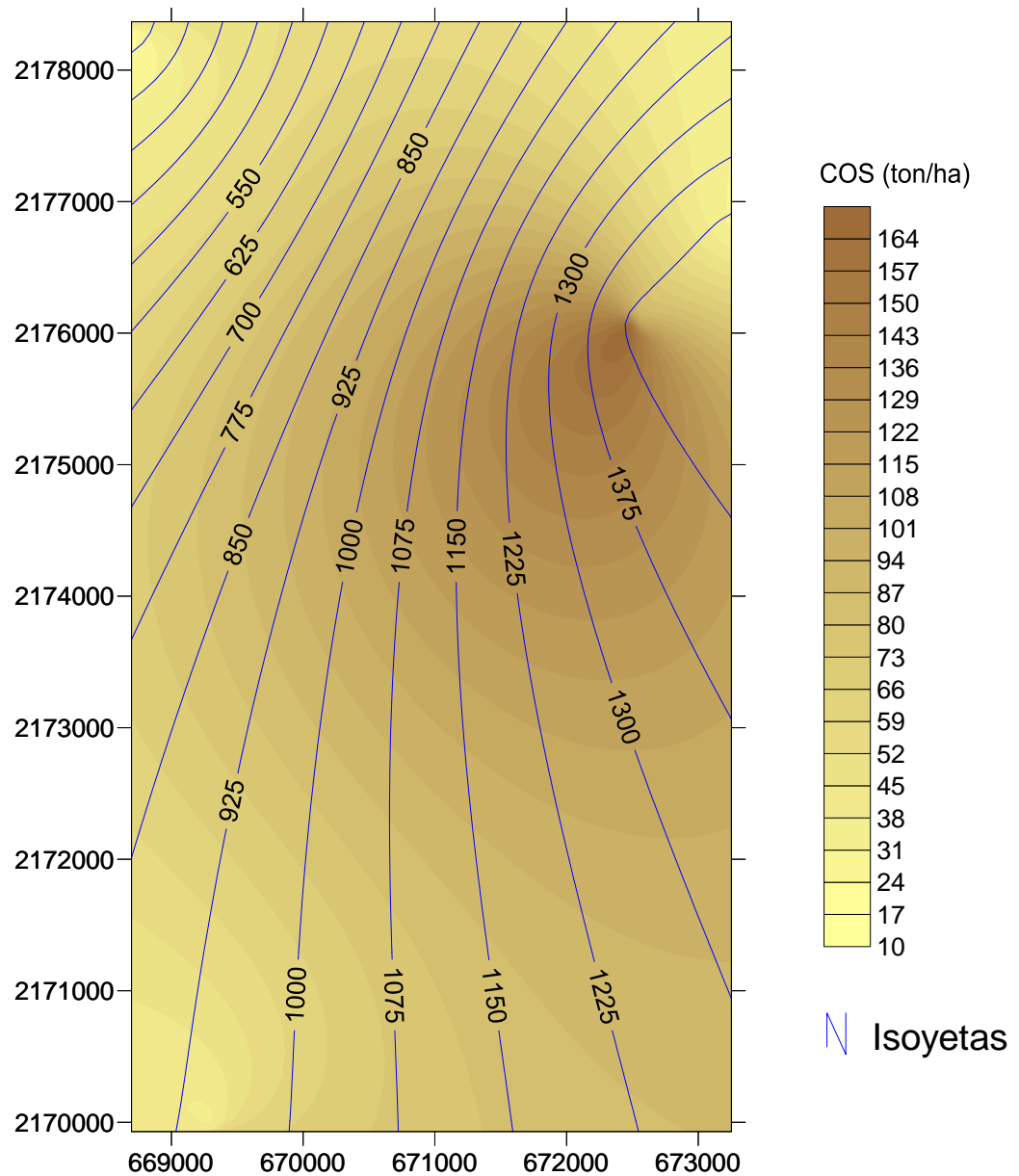


Fig. 53 Distribución espacial de los COS con referencia a las isoyetas

IV. 3.6 Hojarasca

La hojarasca constituye la vía de entrada principal de los nutrientes en el suelo y es uno de los puntos clave del reciclado de la materia orgánica y de los nutrientes. Se entiende por hojarasca la acumulación de los residuos vegetales (hojas, tallos, etc.) sobre la superficie del suelo y ello contribuye, de forma significativa, al flujo de los nutrientes y la energía, así como a la constitución de las reservas húmicas del suelo.

Como un aspecto complementario de esta investigación se establecieron algunas mediciones sobre la hojarasca en la zona estudiada en 2009, con el propósito de contar con esta información para futuros trabajos que permitan un conocimiento más completo de la dinámica del carbono en suelo.

Varios autores han estudiado con detalle la dinámica de la descomposición de la hojarasca de las plantas leñosas, tanto en climas templados como en el mediterráneo. Sin embargo, hay pocos estudios sobre la dinámica de la descomposición de la hojarasca en los pastizales a pesar de su importancia en la producción primaria y secundaria, sobre todo en los sistemas donde los nutrientes disponibles para la vegetación escasean, como ocurre en los ecosistemas de pastizales (Saray Sánchez, *et al* 2008).

A continuación se esbozan los principales factores que controlan la dinámica de la descomposición de la hojarasca. Ellos son:

Efecto de la composición química de la hojarasca

La cantidad de material vegetal, su composición y sus propiedades son esenciales, dado que controlan los procesos de descomposición, mineralización y humificación y actúan como la fase de transición entre la biomasa viva y el suelo. Las tasas de descomposición y liberación de los nutrientes están determinadas por la calidad de la materia orgánica. La calidad del material vegetal es definida por los constituyentes orgánicos y los contenidos de nutrientes.

Efecto de los factores climáticos

Numerosos autores coinciden en señalar que los factores climáticos influyen en el proceso de descomposición de la hojarasca de las diferentes especies vegetales y, en especial, identifican que la temperatura y las precipitaciones son los indicadores de mayor importancia. El clima modifica notablemente la naturaleza y la rapidez de la descomposición de los restos vegetales en la superficie del suelo, de modo que ejerce una importante influencia en el tipo y la abundancia de la materia orgánica.

La humedad y la temperatura aparecen entre las variables más determinantes porque influyen tanto en el desarrollo de la vegetación como en las actividades de los microorganismos, que son factores muy críticos en la formación del suelo. Kononova (1975), al analizar varias publicaciones, llegó a la conclusión de que la intensidad máxima de la descomposición de la materia orgánica se observa en condiciones de temperatura moderada (alrededor de 30°C) y con un contenido de humedad de alrededor del 60-80% de la capacidad máxima de retención de agua del suelo. Sin embargo, el aumento o la disminución de la temperatura y de la humedad simultáneamente, más allá de los niveles óptimos, producen la disminución de la descomposición de la materia orgánica.

Efecto de los organismos del suelo

El proceso de descomposición de la materia orgánica en los suelos del trópico es controlado por los factores biológicos. Como consecuencia, para preservar la fertilidad en estas

regiones se requiere el conocimiento de la actividad de los organismos edáficos. La biota del suelo constituye una fracción primordial de la biodiversidad terrestre. La mayoría de la energía capturada por la vegetación se utiliza por la biota para una serie de funciones esenciales de la integridad y la productividad del sistema. En general, la biomasa total de la biota edáfica constituye una fracción relativamente pequeña (1-8%) de la materia orgánica total del suelo. Sin embargo, se reconoce por numerosos autores que la importancia funcional de estos organismos en los ecosistemas no es directamente proporcional a su biomasa existente, pues pueden regular el comportamiento del sistema a través de sus efectos en el reciclaje de nutrientes y en la estructura del suelo. La descomposición que realizan los organismos se caracteriza por una compleja comunidad de biota, que incluye la microflora y la fauna del suelo. Los hongos y las bacterias son, fundamentalmente, los responsables de que se efectúen los procesos bioquímicos en la descomposición de los residuos orgánicos. De acuerdo con su participación en el proceso de descomposición, la fauna del suelo se agrupa en descomponedores y detritívoros. Los organismos descomponedores son bacterias y hongos que participan en las primeras etapas de la descomposición y consumen principalmente azúcares y aminoácidos.

El Cuadro 36 brinda la tabla de datos obtenida de los análisis de laboratorio de algunas propiedades de la hojarasca.

Cuadro. 37. Datos de Análisis de Hojarasca (2009)

Peso muestra (g)	Muestra	%NT	pH agua (1:5)	pH KCl (1:5)	Delta pH	%Corg.
0,05	P30F1	2,61	5,3	5,43	0,23	82,00
0,05	P30F2	2,55	5,33	5,41	-0,1	82,00
0,05	P30F3	2,80	5,28	5,39	-0,13	80,00
0,05	P30F4	2,83	5,33	5,41	-0,08	80,00
0,05	P30F5	2,53	5,44	5,43	0,05	82,00
0,05	P30F6	3,12	5,34	5,38	-0,07	80,00
0,05	P30F7	2,47	5,18	5,38	-0,25	82,00
0,05	P30F8	2,89	5,17	5,46	-0,21	80,00
0,05	P30F9	2,90	5,19	5,38	-0,19	80,00
0,05	P30F10	2,60	5,18	5,42	-0,28	80,00
0,05	P35F1	0,79	5,6	5,15	0,45	46,00
0,05	P35F2	0,93	5,43	5,09	0,34	44,00
0,05	P35F3	0,85	5,34	5,13	0,21	44,00
0,05	P35F4	0,58	5,32	5,08	0,19	46,00
0,05	P35F5	1,04	5,29	5,09	0,21	46,00
0,05	P35F6	0,88	5,29	5,09	0,2	48,00
0,05	P35F7	0,75	5,25	5,10	0,16	46,00
0,05	P35F8	0,61	5,29	5,08	0,19	46,00
0,05	P35F9	0,78	5,24	5,07	0,16	48,00
0,05	P35F10	0,84	5,24	5,07	0,17	46,00
0,05	P36F1	0,62	4,73	4,57	-0,65	88,00

0,05	P36F2	0,77	4,68	4,55	-0,74	88,00
0,05	P36F3	0,77	4,58	4,56	0,01	86,00
0,05	P36F4	0,68	4,61	4,55	0,06	86,00
0,05	P36F5	0,65	4,66	4,58	0,08	46,00
0,05	P36F6	0,83	4,65	4,49	0,09	20,00
0,05	P36F7	0,76	4,66	4,52	0,11	60,00
0,05	P36F8	0,64	4,69	4,52	0,11	76,00
0,05	P36F9	0,26	4,63	4,47	0,14	58,00
0,05	P36F10	0,94	4,65	4,53	0,13	56,00
0,05	Piñonero1	1,01	4,92	4,68	0,24	58,00
0,05	Piñonero2	1,00	4,77	4,68	0,09	64,00
0,05	Piñonero3	1,03	4,66	4,68	-0,02	62,00
0,05	Piñonero4	1,15	4,63	4,65	-0,02	60,00
0,05	Piñonero5	1,10	4,59	4,63	-0,04	62,00
0,05	Piñonero6	1,12	4,58	4,63	-0,05	60,00
0,05	Piñonero8	0,98	4,58	4,65	-0,07	58,00
0,05	Piñonero9	1,04	4,53	4,63	-0,1	60,00
0,05	Piñonero10	0,94	4,59	4,65	-0,06	62,00
0,05	Yucca1	1,02	6,64	6,65	-0,01	82,00
0,05	Yucca2	0,78	6,62	6,7	-0,08	82,00
0,05	Yucca3	0,81	6,54	6,67	-0,13	82,00
0,05	Yucca4	0,67	6,55	6,82	-0,27	82,00
0,05	Yucca5	0,66	6,58	6,85	-0,27	82,00
0,05	Yucca6	0,70	6,55	6,77	-0,22	84,00
0,05	Yucca7	0,69	6,6	6,70	-0,1	84,00
0,05	Yucca8	0,66	6,57	6,79	-0,22	82,00
0,05	Yucca9	0,49	6,62	6,76	-0,14	82,00
0,05	Yucca10	0,54	6,55	6,76	-0,21	82,00

IV.4 Cambios del Carbono Orgánico en el Suelo entre 1987 - 2009

Los métodos para estudiar los almacenes de carbono en el suelo (Rodeghiero *et al.*, 2010) pueden clasificarse, según el objetivo del estudio, en local, regional o global. En el nivel local, que es el caso que nos ocupa, se desea estimar el cambio medio de COS sobre el tiempo en un área pequeña y, dada la heterogeneidad espacial del COS y su naturaleza dinámica, se requiere de la detección directa de los cambios sobre el tiempo.

Cuando se considera una metodología para determinar los cambios de COS, tenemos que enfrentarnos al problema de tratar de detectar un cambio pequeño, esto es, cambio de COS neto sobre el tiempo en almacenes de carbono en el suelo que son muy grandes. Existen diferentes métodos para determinar los cambios en las existencias de COS, pero aquí sólo nos referiremos al denominado *enfoque de inventarios repetidos*, (Rodeghiero *et al.*, 2010),

por considerarse que es el que genera datos más confiables en períodos largos de tiempo, como es el caso de este trabajo.

El *enfoque de inventarios repetidos* está basado en mediciones *directas* del carbono orgánico en muestras de suelo tomadas por dos inventarios sucesivos sobre un largo período, esto es, un periodo de muchos años. Puesto que las entradas y salidas anuales de carbono son relativamente pequeñas comparadas al carbono almacenado en el suelo, el tiempo requerido para detectar cambios estadísticamente significativos de las reservas de carbono en el suelo dentro de un sitio está en el orden de al menos 5 a 10 años (Rodeghiero, *et al*, 2010).

El método considerado tiene en cuenta los siguientes aspectos: diseño muestral apropiado a los objetivos, preparación y análisis químicos de las muestras, cálculo del COS y, finalmente la comparación estadística del COS en el lapso de tiempo considerado.

➤ Muestreo de suelo

Se delimitó la zona de estudio y se estableció el diseño muestral de acuerdo con un diseño de tipo adaptativo, propuesto por Thompson (1992), el cual es un nuevo diseño muestral en que las unidades muestrales son seleccionadas basándose en valores de las variables de interés observadas durante un muestreo previo. Usando este diseño, se localizaron nuevamente los puntos de muestreo correspondientes a los 21 perfiles estudiados en la zona en el año 1987 (Valera, 1993). Además, se incluyeron puntos de muestreo al norte, al sur, al este y al oeste del punto georeferenciado y reubicado, teniendo un total de cinco muestras por punto de muestreo.

Se tomaron muestras de suelos de los horizontes A y B de los sitios reportados en las tres primeras filas del Cuadro 24 (epígrafe IV.3.1), cuya ubicación geográfica aparece expuesta en la Fig. 36. Estos tres perfiles se utilizaron para la comparación de los cambios en los almacenes de carbono en suelo entre los años 1987 y 2009.

➤ Preparación de las muestras de suelos y determinación de sus propiedades físicas y químicas

Como ya explicamos anteriormente, las muestras, de los horizontes A y B del suelo, se colocaron en bolsas de polietileno, se les asignó y rotuló adecuadamente su clave de identificación, así como, su profundidad en centímetros y la fecha de su recolección; posteriormente, fueron llevadas al laboratorio. Se llevó a cabo el proceso de secado y tamizado de igual manera que las muestras obtenidas en el año 1987.

Aunque se determinaron todas las propiedades que se habían estudiado en el año 1987, sólo nos referiremos ahora a las que son de interés primordial para la determinación de los cambios en COS. Ellas son:

- ✓ Densidad aparente obtenida por el método del cilindro
- ✓ Porcentaje de materia orgánica por el Método de Walkley y Black.

✓ Contenidos de carbono en suelo

Para la obtención de los contenidos de carbono en suelo, se realizaron los cálculos en todos los casos, considerando la densidad aparente para cada horizonte. El cálculo de la densidad aparente se determinó a partir de la ecuación ya reportada anteriormente, pero para claridad de la exposición la repetimos aquí:

$$Da = \frac{\text{Peso seco del suelo} - (\text{peso de raíces} + \text{piedras} + \text{residuos})}{\text{Vol. del cilindro de muestreo} - (\text{Vol. de raíces} + \text{Vol. piedras} + \text{Vol. residuos})}$$

siendo el volumen del cilindro $\pi r^2 h$, donde h y r son la altura y el radio del cilindro respectivamente.

Considerando los volúmenes y pesos de raíces, piedras y residuos, ya que estos datos se utilizan para corregir la densidad aparente del suelo, mediante la fórmula anterior, el cálculo del carbono se obtiene en unidades de toneladas por hectárea, mediante la siguiente fórmula:

$$C(\text{ton/ha}) = \text{Porcentaje de carbon} * \text{profundidad de la muestra} * \text{densidad de la muestra}$$

Recordemos que se tomaron en consideración las profundidades y la transformación de unidades pertinentes (Etchevers *et al.*, 2005).

➤ Análisis estadístico

Además de los estadísticos descriptivos, se utilizó el *modelo lineal general*, que permite la comparación de la variable respuesta COS en los diferentes niveles de los tres factores considerados, a saber, año (niveles 1987 y 2009), horizonte (niveles A y B) y perfil (niveles P30, P35 y P36) y, también en las interacciones de segundo y tercer orden. Las suposiciones del modelo, en especial la homogeneidad de varianza, fueron consideradas en el análisis de los datos, los que fueron procesado en el sistema Minitab 14.

El Cuadro 37 brinda los estadísticos descriptivos para el carbono orgánico en suelos (COS) en los dos años considerados. Puede apreciarse que la media en el año 2009 es mayor que en el año 1987, pero también muestra mucho más variabilidad.

Cuadro 38. Estadísticos descriptivos para COS2009, COS1987

Variable	Total	Media	DesvEs	Mínimo	Mediana	Máximo
COS2009	30	89.3	73.8	23.8	57.7	279.7
COS1987	30	21.29	7.20	12.48	19.34	34.56

Los Cuadros 38 A y 38 B muestran los resultados de la aplicación del modelo lineal general a la muestra de datos, habiendo omitido los puntos aberrantes, para alcanzar el supuesto de homogeneidad de varianza.

Cuadro. 39 A. Análisis de Varianza para la variable respuesta COS

Causa de variación	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	p
AÑO	1	42441	66156	66156	946.34	0.000
HORIZ	1	14052	15032	15032	215.03	0.000
PERF	2	5863	11514	5757	82.35	0.000
AÑO*PERF	2	11219	13041	6520	93.27	0.000
AÑO*HORIZ	1	13573	8406	8406	120.25	0.000
HORIZ*PERF	2	21411	35393	17696	253.14	0.000
AÑO*HORIZ*PERF	2	44802	44802	22401	320.44	0.000
Error	46	3216	3216	70		
Total	57	156576				

Debe enfatizarse, por ser nuestro principal objetivo de investigación, que existe diferencia significativa entre el COS almacenado en 1987 y el almacenado en 2009. También puede apreciarse en el Cuadro 39 A que existe diferencia entre todos los factores principales y todas las interacciones de primero y segundo orden, ya que los valores de p empírico son casi cero para todas las comparaciones realizadas (Linares *et al*, 2012).

El gráfico que se puede observar debajo da las comparaciones entre los tres efectos principales (año, horizontes y perfiles), lo que permite visualizar los resultados inferenciales antes expuestos.

El Cuadro 39 B brinda los coeficientes del modelo lineal ajustado, así como, el error estándar de esos coeficientes, las pruebas t y los valores de p empírico.

El coeficiente de determinación ($R^2 = 97.95\%$), es alto, lo que indica un buen ajuste de los datos al modelo.

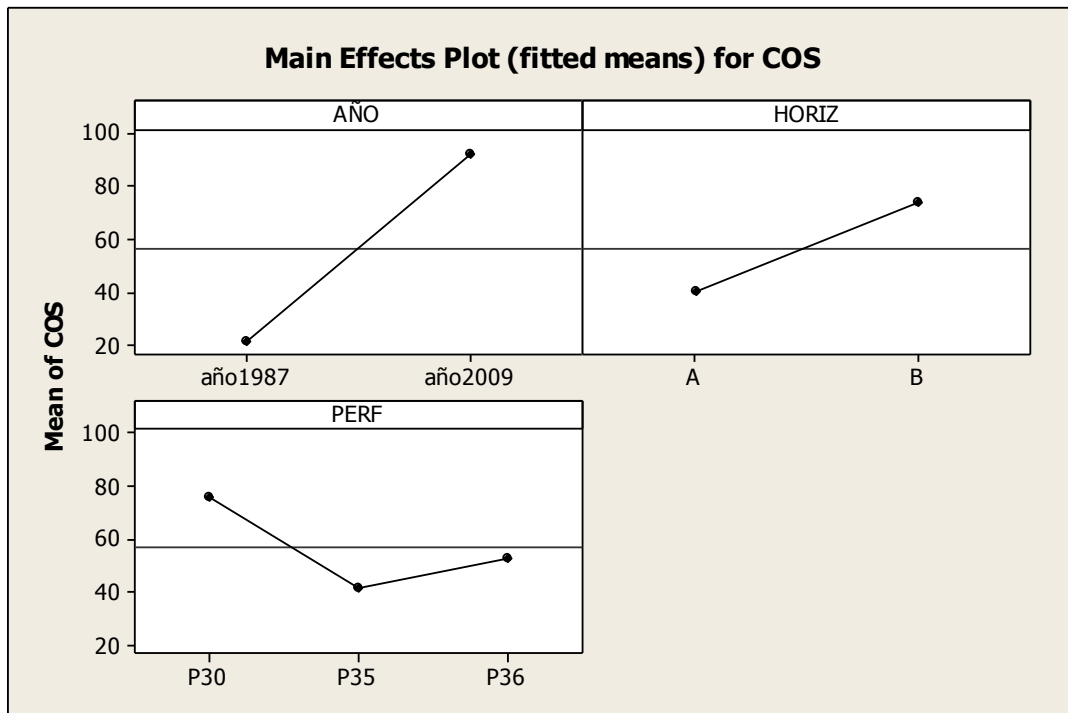


Fig. 54. Grafico para la Comparación entre los Efectos Principales del modelo

Cuadro 39 B. Coeficientes del modelo lineal general

Term	Coef	SE Coef	T	p
Constant	56.710	1.152	49.23	0.000
AÑO				
año1987	-35.436	1.152	-30.76	0.000
HORIZ				
A	-16.892	1.152	-14.66	0.000
PERF				
P30	19.024	1.639	11.61	0.000
P35	-15.064	1.532	-9.83	0.000
AÑO*PERF				
año1987 P30	-21.952	1.639	-13.39	0.000
año1987 P35	12.316	1.532	8.04	0.000
AÑO*HORIZ				
año1987 A	12.632	1.152	10.97	0.000
HORIZ*PERF				
A P30	-31.652	1.639	-19.31	0.000
A P35	-3.667	1.532	-2.39	0.021
AÑO*HORIZ*PERF				
año1987 A P30	36.787	1.639	22.44	0.000
año1987 A P35	1.882	1.532	1.23	0.225

Ya explicamos antes que los sitios considerados corresponden a Regosoles, como suelos predominantes o principales, y Andisoles húmicos y Litosoles, como suelos secundarios, según la carta edafológica 1:250 000 de INEGI (2000).

En el año 1987, la vegetación reportada era Pastizal inducido y Bosque de pino (Valera, 1993).

En el año 2009, se observó (epígrafe IV.3.1) lo siguiente acerca de la fisiografía de la zona, lo que pudiera explicar el aumento de COS con relación al año 1987:

Los sitios P30 (Fig. 36) y P35 (Fig. 37), principalmente son planicies, aunque se presentan lomeríos; en esas planicies se localizan Bosque de Encino - Aile y Pastizal en ecotono, lo que hace pensar que ha habido un posible cambio de uso de suelo paulatino, siendo el Bosque de Encino la vegetación clímax, seguido por el Bosque de Aile que es ahora el Bioma predominante, observándose sin embargo que pierde territorio frente al avance inminente del Pastizal (género *Mullenbergia*).

En el sitio P36 (Fig. 38), se presenta una fisiografía de lomerío que rodea a la planicie donde se tomaron las muestras, ubicándose bosque de Pino (por casusa de plantaciones inducidas) – Encino – Aile – Pino – Pastizal; esto hace pensar que la vegetación clímax del lugar es como en los casos anteriores, el Bosque de Encino que es desplazado por el de Aile, que a su vez es desplazado por el Pastizal, pero también se nota la presencia importante de plantaciones de pinos ya que se encontraron plantaciones de *Pinus* pátula en áreas concentradas cercanas al sitio de muestreo.

Finalmente, debe destacarse que el *enfoque de inventarios repetidos* parece ser un método efectivo para determinar los cambios medios de COS en zonas pequeñas, como es el caso de la zona de Teziutlán, estado de Puebla, México. A través de este método pudo apreciarse un incremento de COS, estadísticamente significativo, en 2009 comparado con 1987.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de esta Tesis son de suma importancia para conocer más detalladamente la relevancia de la dependencia entre el comportamiento climático y la dinámica del carbono, que se refleja de forma directa en el incremento o disminución del COS.

A continuación se plantean, a manera de conclusiones, los aspectos más relevantes de la presente investigación.

- Se analizó la información existente sobre temperatura y precipitación de la región de estudio en tres periodos de tiempo (A, B y C), y se obtuvo la caracterización climática. Del análisis realizado a esta información **para el periodo de 1987**, se observó que: los regímenes de humedad van del Perúdicó al Údico en su mayoría y sólo en un caso Ústico, por lo que se señala que existía la humedad adecuada o incluso un exceso de ésta en la región. Así mismo, la temperatura, varió entre los 8°C y 22°C, oscilando el régimen de temperatura entre térmico e isotérmico, pasando por hipertérmico e isoméxico. Con respecto a los mapas de isotermas de la región no se observa variaciones aparentes entre los datos tratados estadísticamente con respecto a los datos facilitados por la Comisión Nacional del Agua. En los mapas de isoyetas de la zona, se observa que existe una variación en el comportamiento de las precipitaciones del periodo intermedio (B) con respecto a los demás periodos.
- Se determinaron las propiedades físicas y químicas del suelo, así como las características del medio ambiente y se establecieron las relaciones con la formación vegetal y el secuestro de carbono. Se confirmó, la importancia de la densidad aparente (DA) como una propiedad que coadyuva a la comprensión del fenómeno de la dinámica del almacenamiento del carbono (C) en los suelos, la cual se encuentra íntimamente relacionada a los cambios del COS.
- Se desarrollaron modelos sobre secuestro de carbono orgánico en suelos de la zona, que permitieron llevar a cabo diferentes comparaciones de interés. Debe destacarse el modelo que explica la influencia de los elementos altitud y precipitación sobre el porcentaje de carbono orgánico (%CO), lo que ratifica la influencia de algunas condiciones ambientales sobre %CO. Se observó la relación de las variables climáticas con el almacenamiento del carbono en el suelo, y el comportamiento del COS por horizontes, permitiendo tener una mejor comprensión de la dinámica del carbono. Por otra parte, el modelo de regresión lineal mixto permitió conocer en detalle la dependencia entre el comportamiento climático y los contenidos de COS en la región de estudio, reflejando cuan importantes son las condiciones ambientales para la dinámica del C en el suelo, tanto en su transformación como en su almacenamiento.

- Se estableció la distribución espacial del almacenamiento del COS y su relación con el clima y, se formularon modelos predictivos que relacionan las variables climáticas con la distribución de espacial del COS. A través de los mismos se pudo corroborar resultados observados tales como que en temperaturas aproximadas de entre 15.5 – 16 °C y con precipitaciones aproximadas de entre 120 a 280 mm anuales se presentan los más altos contenidos de COS en la región de Teziutlán, Puebla, México.
- **Se obtuvo información reciente (2009) sobre el medio físico, los horizontes orgánicos del suelo, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y de la hojarasca en una sub-área de la región de estudio.** Por otro lado, la fisiografía de la región muestreada corresponde en su mayoría a planicie, aunque existen sitios en los que cambia a lomerío. El tipo de vegetación en los sitios corresponde en su mayoría Bosque de Encino – Aile – Pastizal, presentándose solo un sitio con vegetación diferente, siendo esta la Yucca.
- En la descripción de los horizontes orgánicos de los sitios, en general, se presentó la secuencia de capas orgánicas del tipo Ol (capa orgánica de “litter”) – Of (capa orgánica fragmentada) – A (Horizonte A órgano-mineral), de modo que en todos los casos se tiene la forma de humus Mull, que de acuerdo con Fassbender (1984) tiene un grado de descomposición de la materia orgánica elevado, al igual que su grado de organización estructural para este tipo de humus; la mezcla del material orgánico y mineral, y la unión de estos componentes del suelo son de tipo fisicoquímica, en el cual las sustancias húmicas están asociadas con arcillas de Al y Fe, con raras macroestructuras biológicas con estructura de tipo granular fina, normalmente con poca actividad de lombrices pero fuerte actividad fúngica.
- Los valores de densidad aparente de los sitios muestreados, oscilan entre 0.35 a 0.74, los cuales se encuentran en rango de acuerdo con lo reportado en la NOM-021-SEMARNAT-2000 para suelos orgánicos y volcánicos. Los valores de las densidades aparentes en esta zona son indicadores de la calidad en que se encuentran los suelos, debido a la vocación forestal que de manera natural tienen. Además de que se ratifica el hecho de que los suelos forestales presentan valores de densidades aparentes menores a 1 g/cm³, refiriendo también que estos suelos forestales presentan una porosidad más elevada.
- Los elevados valores de la relación C/N encontrados nos indican la presencia de un buen proceso de mineralización de la materia orgánica, además de una elevada acumulación de compuestos orgánicos. Esta propiedad es considerada como un importante indicador de la calidad del suelo.

- Se establecieron modelos sobre secuestro de carbono en suelos, en relación con las variables climáticas **en el periodo actual (2009)** y la distribución espacial del almacenamiento de carbono orgánico en suelos. Al ajustar el modelo a los datos se observó, que de las variables involucradas en el análisis, el régimen de Temperatura resultó ser una variable significativa a diferencia del régimen de humedad. Se obtuvieron las ecuaciones de regresión para cada combinación de regímenes de humedad y temperatura presentes.
- Se elaboró una tabla de datos sobre mediciones de propiedades químicas de la hojarasca en una parte de la zona estudiada en 2009, con el propósito de contar con esta información para futuros trabajos que permitan posteriormente un conocimiento más completo de la dinámica del carbono en suelo.
- Se compararon las estimaciones de carbono orgánico en suelos tomadas en 1987 con las tomadas en 2009. El *enfoque de inventarios repetidos* resultó un método efectivo para determinar los cambios medios de COS en una zona pequeña de Teziutlán, estado de Puebla, México. Pudo apreciarse un incremento de COS, estadísticamente significativo, en 2009 comparado con 1987.

Finalmente, parece razonable concluir que la velocidad del proceso de transformación de la materia orgánica y, a su vez, del proceso de almacenamiento del carbono, están directamente influenciados por la variabilidad climática, de regímenes de humedad y temperatura detectados, realizándose la dependencia entre los regímenes de humedad y temperatura que se presentan en la región de Teziutlán.

Por otra parte, se constató que la modelación puede dar resultados rápidos y confiables sobre las direcciones y cantidades de cómo cambia la materia orgánica en la zona de estudio y, puede recomendarse como enfoque metodológico para futuras investigaciones que se realicen para encontrar mecanismos de mitigación del cambio climático propuestos por el Protocolo de Kyoto.

Es recomendable, como una buena alternativa y oportunidad para modificar prácticas que degradan el medio y a su vez promover la sostenibilidad de los recursos, la venta de servicios ambientales, tales como el secuestro de carbono y la protección de las cuencas hidrológicas, que son acciones ligadas íntimamente a los objetivos de este proyecto de investigación.

VII. LITERATURA CITADA

- Aguilar S. A. 1988. *Materia orgánica*. En Norma Oficial Mexicana NOM – 021 – SEMARNAT – 2000.
- Andrén O., Steen E. y Rajkai K. 1992. Modelling the effects of moisture on barley straw and root decomposition in the field. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 24. pp. 727 – 736.
- Ángeles C. E. R. Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el Bosque de Oyamel. Tesis (Doctorado en Ciencias). México. Colegio de Posgraduados, Posgrado en Botánica, 2010. pp. 120.
- Alvear M., F. Reyes, A. Morales, C. Arriagada y M. Reyes. 2007. Actividad biológica y agregados estables al agua en dos tipos de formaciones vegetales de un bosque templado del Centro - sur de Chile con perturbación antrópica. *Ecología Austral.* Vol. 17. N° 1.
- Arriaga-Cabrera, L., J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez y E. Loa. 2000. *Regiones Prioritarias Terrestres*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. p. 609.
- Arteaga Martínez B. y Moreno Zárate C. 2006. *Los hongos comestibles silvestres de Santa Catarina del Monte Estado de México*. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. Año/Vol. 12. No. 002. pp. 125-131.
- Avilés M. S. M., A. Galvis S., T. M. Hernández M. y G. Arévalo M. 2007. *Relación de la textura y superficie específica con la materia orgánica del suelo en selvas*. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente. Universidad Autónoma de Chapingo. México. Vol. 13. N° 2. pp. 109 – 113.
- Bailey, Delia and Ferdinand Alimadhi. 2007. "ls.mixed: Mixed effects linear model" in Kosuke Imai, Gary King, and Olivia Lau, "Zelig: Everyone's Statistical Software," <http://gking.harvard.edu/zelig>
- Bauder, J. 1999. When is organic matter built up or used up?. En Pajares S., S. Covaleda, J. F. Gallardo, J. D. Etchevers y C. Prat. 2005. Calidad edáfica de dos toposecuencias del Eje Neovolcánico Mejicano. Memorias 5° Congreso Forestal Nacional, Viseu. Portugal. 16 - 19 Mayo de 2005. Actas das Comunicasoes. Sociedad Portuguesa de Ciencias Florestais.
- Beaumont, R. E. y C. E. Merenson. 1999. *El Protocolo de Kyoto y el Mecanismo para un Desarrollo Limpio Nuevas posibilidades para el Sector Forestal de América Latina y el Caribe*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Departamento de Montes, FAO, Roma.

- Belausteguigoitia, J. C. y O. P. Soriano. 1996. *Valuación económica del medio ambiente y de los recursos naturales*. Economía Informa, vol. 253, p. 45-55.
- Besoain, M. E., P. M. Peralta, y M. S. Massaro. 2000. Mineralogía y génesis de algunos suelos de cenizas volcánicas de Chiloé Continental, Chile. *Agric. Téc.* vol. 60, N° 2. pp. 127-153.
- Bingham, G., R. Bishop, M. Brody, D. Broley, E. Clark, W. Cooper, R. Constanza, T. Hale, G. Hayden, S. Kellert, R. Norgaard, B. Norton, J. Payne, C. Russell y G. Suter. 1995. *Issues in ecosystem valuation: improving information for decision-making*. Ecological Economics, vol. 14, p. 73-90.
- Bolin, B., B. R. Döös, J. Jager y R. A. Warrick, 1996. *The Green House Effect, Climate Change and Ecosystems*. Ed. John Wiley & Sons.
- Broll G., H J Brauckmann, M. Overesch, B. Junge, C. Erber, G. Milbert, D. Baize And F. Nachtergaele 2006. Topsoil characterization-recommendations for revision and expansion of the FAO-Draft (1998) with emphasis on humus forms and biological features. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, vol.169, pp. 453-461.
- Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler, y P. Woomeer, 1993. *Tropical Forest: their Past, Present and Potential Future Role in the Terrestrial Carbon Budget*. *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 70, p. 71-94.
- Brown, S., O. Masera y J. Sathaye. 2000. *Project-Based Activities*. In: *Land use, land-use change, and forestry*. p. 283-338. IPCC. Cambridge University Press.
- Cabrera L. T. A. 2000. Aporte al conocimiento de la microbiota fúngica del suelo de la amazonia colombiana, con énfasis en tres grupos funcionales. Tesis (Biólogo). Pontificia Universidad Javeriana. Santafé de Bogotá. p. 353. En Jaramillo J. D. F, Introducción a la ciencia del suelo, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Castellanos J. Z., J. X. Uvalle – Bueno, A. Aguilar – Santelises. 2000. Manual de interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Colección INCAPA. pp. 200.
- Challenger A. 1998. *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro*. CONABIO, Instituto de Biología-UNAM y Asociación Sierra Madre S.C. p. 443-615.
- Constanza, R. 1991. *Environmental Economics: The Science and Management of Sustainability*. New York: Columbia University Press.
- Coûteaux M-M., Bottner P., Anderson J. M., Berg B. Bolger T. Casals P., Romanyà J., Thiéry J. M. y Vallejo V. R. 2001. Decomposition of ¹³C-labelled standard plant material in a latitudinal transect of European coniferous forests: Differential impact

of climate on the decomposition of soil organic matter compartments. *Biogeochemistry*. Vol. 54. pp. 147 – 170.

- Covalada, S., S. Pajares, J.F. Gallardo, J.D. Etchevers y J. Padilla. 2004. *Cambio de algunas propiedades químicas por efecto del manejo de cultivos en tepetates de Tlaxcala (México)*. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Cartagena de Indias. En Pajares S., S. Covalada, J. F. Gallardo, J. D. Etchevers y C. Prat. 2005. Calidad edáfica de dos toposecuencias del Eje Neovolcánico Mejiicano. Memorias 5° Congreso Forestal Nacional, Viseu. Portugal. 16 - 19 Mayo de 2005. Actas das Comunicasoes. Sociedade Portuguesa de Ciencias Florestais.
- Clark I. y W. B. Haper. 2008. *Practical Geostatistics 2000*. Geostokos (Ecosse) Limited. Scotland, UK. pp. 325.
- Clark I. 2001. *Practical Geostatistics*. Geostokos. (Ecosse) Limited. Scotland, UK. pp. 119.
- Daly, G. C. 1997. Introduction: what are ecosystem services? In: G. C. Daily, (editor). *Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems*. Washington, D.C.: Island Press.
- Dean W. E. JR. 1974. Determination of Carbonate and Organic Matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *J. Sedim. Petrol.* 44: 242-248. En Páez O., F., M. de L. Fong L., H. Fernández P. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*.
- Dixon, R. K., J. K. Winjum y P. E. Schroeder. 1993. Conservation and sequestration of carbon. The potential of forest and agroforest management practices. *Global Environmental Change*. p. 159-173.
- ERIC II. 2000. Bases de datos climáticos del programa de Evaluación Rápida de la Influencia del Clima. Comisión Nacional del Agua (CNA).
- Espinosa, J. 1994. Acidez y encalado de los suelos. En: Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Bogotá. pp 113-128.
- Etchevers B, J. D. 1987. Determinación de nitrógeno en suelos. p. 45-83. En A. Aguilar S., J. D. Etchevers B. y J. Z. Castellanos R. (ed.), *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. Soc. Mex. De la Ciencia del Suelo. Chapingo, Edo. de Mex. México. Publicación Especial N°. 1.
- Etchevers B. J. D., C. M. Monreal, C. M. Hidalgo, M. M. Acosta, J. C. Padilla y R. M. R. López. 2005. *Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas*. Colegio de Posgraduados, México.

- FAO. 1999. *State of the world's forest*. Rome Information Division. Roma, Italia.
- Fassbernder H. W. 1984. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Fong Lee M. de L., y H. Fernández-Pérez. 1983. Comparación de tres técnicas para analizar materia orgánica en sedimentos. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Gamboa M. A., Hidalgo C., De León F., Etchevers J.D., Gallardo J. F. y Campo J. 2008. Nutrient addition differentially affects soil carbon sequestration in secondary tropical dry forests: early-versus late-succession stages. *Journal of the Society for Ecological Restoration International*.
- García Oliva F., Hernández G. y Gallardo Lancho J. F. 2006. *Comparison of ecosystem C pools in three forests in Spain and Latin America*. *Ann. For. Sci.* 63:519-523.
- Goijberg R. G., y A. Aguilar S. 1987. pH del suelo y necesidades de cal. P. 17-44. En A. Aguilar S., J. D. Etchevers B. y J. Z. Castellanos R. (ed.), *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. Soc. Mex. De la Ciencia del Suelo. Chapingo, Edo. de Mex. México. Publicación Especial N°. 1.
- Golden Surfer Software v. 8. 2008. Surface Mapping System. Golden Software Inc.
- González Molina L., Etchevers Barra J. D. y Hidalgo Moreno C. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42:741-751.
- Goudie, A. 1990. *The Human Impact on the Natural Environment*. Basil Blackwell Ltd, Oxford, U.K. 3th Edition. p. 388.
- Grundstein A. 2009. Evaluation of climate change over the continental United States using a moisture index. *Climate Change*. Vol. 93. pp. 103 – 115.
- Hamid A. S., Reza F. H. 2008. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran. *Irrigation Science*. Vol. 26. pp. 303 – 312.
- Hervé A. 2007. Partial Least Square Regression PLS-Regression. In: Neil Salkind (ed), *Enciclopedia of Measurement and Statistics*. Thousand Oaks (CA): Sage.
- Hodny J., Mather J. R. 1995. Climate change and water resources of the Delaware River Basin. *Publications in climatology*. Vol. 48. N° 1.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) – Instituto Nacional de Ecología (INE). 2000. *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*. pp. 1-203.
- INE/SEMARNAT. 2000. *Estrategia Nacional de Acción Climática. Estados Unidos Mexicanos*. Primera Edición. p. 219. (www.ine.gob.mx)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1990. *Climate Change 1990. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1995. *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate Change 2007. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- Jansson P. E. & Berg B. 1985. Temporal variation of litter decomposition in relation to simulated soil climate. Long-term decomposition in a Scots pine forest. V. Can. J. Bot. Vol. 63. pp.1008 – 1016.
- Jaramillo J. D. F. 2002. *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. pp. 613
- Jones, J. B. y W. J. A. Steyn. 1973. *Sampling handling and analysis of plant tissue samples*. En Alcántar, G. G., J. D. Etchevers B. y A. Aguilar S. *Los análisis físicos y químicos: su aplicación en agronomía*. Montecillo, Edo. de Mex. México.
- Kononova, M.M. 1975. Humus of virgin and cultivated soils. In: *Soil components*. Vol. I. (Ed.J.E. Gieseking). Springer-Verlag. Nueva York. p. 475
- Leff, E. 1998. *Saber ambiental: sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. Siglo XXI editores, UNAM y PNUMA, México, D.F.
- León A., R., y A. Aguilar S. 1987. *Materia Orgánica*. p. 85-91. En A. Aguilar S., J. D. Etchevers B. y J. Z. Castellanos R. (ed.), *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. Soc. Mex. De la Ciencia del Suelo. Chapingo, Edo. de Mex. México. Publicación Especial N°. 1.
- Linares F. Gladys; Valera P. Miguel A.; Castillo M. Maribel. 2012. *Cambios del carbono orgánico en el suelo entre 1987- 2009 en una zona de Teziutlán, Puebla*,

México. En: Memorias del XI Congreso Internacional y XVII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, Sinaloa, México.

- Linares Fleites, G., Valera Pérez, M. A. y Castillo Morales, M. 2009. *Opción de mitigación del cambio climático: secuestro de carbono en suelos de la Sierra Norte de Puebla, México*. En: VII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, I Congreso de Cambio Climático. Ciudad de la Habana. Cuba.
- Linares Fleites G., Valera Pérez M. A., Castillo Morales M. y Sandoval Solís M. de L. 2008. *Relación del Contenido orgánico y el nitrógeno en suelos forestales de Teziutlán, Puebla*. En: Memorias del VII Congreso Internacional XIII Congreso Nacional III Congreso Regional de Ciencias Ambientales, Sonora, México.
- Linares Fleites G., Valera Pérez M. A. y Castillo Morales M. 2005. Regresión múltiple para la interpretación de configuraciones de suelos en la Sierra Norte de Puebla obtenidas por escalamiento multidimensional. En: Memorias en extenso del XX Foro Nacional de Estadística, Guanajuato, México, pp. 77-83.
- Mallik, A. V., C. H. Gimmingham and A. A. Rahman. 1984. *Ecological effects of heather burning. I. water infiltration, moisture retention and porosity of surface soil*. Journal of Ecology. N° 72. pp. 767-776. En Pérez G. C. A., J. López B. y G. Vela C. 2009. Influencia del relieve en las propiedades de un suelo afectado por incendio en el volcán El Pelado, Centro de México. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. N°. 69. pp. 7 – 20.
- Manfrinato W., M. Piccolo, C. Clemente, M. Bernoux, C. Pellegrino. 2001. Medición de la Variabilidad Espacial y Temporal del Carbono del Suelo con el uso de los isótopos estables, en una transición Bosque-Pradera en el Estado del Paraná, Brasil. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia-Chile.
- Martínez, J., A. Fernández y P. Osnaya. 2004. *Cambio Climático: una visión desde México*. INE-SEMARNAT. México. p. 525.
- Masera, O. 1991. *México y el cambio climático global: un balance crítico*. Ciencia y Desarrollo, vol. 17, no.100, p. 52-67.
- Masera, O. 1995. *Estimación de parámetros biológicos e indicadores económicos para proyectos forestales de captura de carbono*. Documento de trabajo No. 16. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA). Michoacán, México.
- Masera, O. 1995c. *Future greenhouse emission and sequestration scenarios from land use change in Mexico*. Report to UNEP from the Project Mexico's country study on greenhouse gas emissions, Instituto Nacional de Ecología, Mexico City.

- Masera, O., J. M. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from deforestation in Mexico: current situations and long-term scenarios. In: W. Makundi and Sathaye (editores). *Carbon emissions and sequestration in forest: case studies from seven developing countries*. Berkeley, California.
- Mather J. R., Feddema J. J. 1986. Hydrologic consequences of increases in trace gases and CO₂ in the atmosphere. En: *Effects of changes in stratospheric ozone and global climate*. Vol. 3. Climate change. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., pp. 251 – 271.
- McCabe G. J., Wolock D. M. 1992. Effects of climatic change and climatic variability on the Thornthwaite moisture index in the Delaware River Basin. *Climate Change*. Vol. 20. pp. 143 –153.
- McCabe G. J., Wolock D. M., Hay L. E., Ayers M. A. 1990. *Effects of climatic change on the Thornthwaite moisture index*. Water Resour Bull Vol. 26. N°4. pp. 633 – 643.
- McLean E. O. 1982. Soil pH and Lime Requirement. En Norma Oficial Mexicana NOM – 021 – SEMARNAT – 2000.
- MINITAB. Release 15. 2005. Statistical Software. Minitab Inc.
- Mintzer, I. M., 1992. *Confronting climate change. Risk implications and responses*. Cambridge University Press.
- Mohseni O. y Stefan H. G. 2001. Water Budgets of two watersheds in different climatic zones under projected climate warming. *Climate Change*. Vol. 49. pp. 77 – 104.
- Montgomery D. C., Peck, E. A. and Vining G. 2004. *Introducción al análisis de regresión lineal*. Compañía editorial Continental. México.
- Norma Oficial Mexicana NOM – 021 – SEMARNAT – 2000. DOF 2003 [en línea].
- OECD. 1993. *OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews. A Synthesis Report by the Group on the State of the Environment*. OECD, Paris. pp. 35
- Ordóñez J. A. 1999. Captura de carbono en un Bosque Templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAT.
- Ordóñez J. A., Masera O. 2001. *Captura de carbono ante el Cambio Climático*. Madera y Bosques, vol. 7 no. 1, p. 3-12.

- Orozco, H. 1984. *La materia orgánica de los suelos y su relación con los abonos orgánicos*. En: Curso Fertilización Racional del Suelo. SCCS. Medellín. pp. 339-367.
- Orozco, F. H. 1999. *Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas*. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. pp. 231.
- Pajares S., S. Covalada, J. F. Gallardo, J. D. Etchevers y C. Prat. 2005. *Calidad edáfica de dos toposecuencias del Eje Neovolcánico Mejicano*. Memorias 5º Congreso Forestal Nacional, Viseu. Portugal. 16 - 19 Mayo de 2005. Actas das Comunicasoes. Sociedade Portuguesa de Ciencias Florestais. En <http://digital.csic.es/handle/10261/24224>.
- Parton W. J., Schimel D.S., Cole C. V. & Ojima D. S. 1987. *Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands*. Soil Sc. Soc. Am. J. Vol.51. pp. 1173 –1179.
- Pérez G. C. A., J. López B. y G. Vela C. 2009. Influencia del relieve en las propiedades de un suelo afectado por incendio en el volcán El Pelado, Centro de México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*. N°. 69. pp. 7 – 20.
- PK. 1997. Protocolo de Kyoto. www.unfccc.int/resource/convkp.html
- Ponce H. R., K. Parviz y J. Antoine. 2004. Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes. FAO, Roma. p. 156.
- Post M. W., Izaurralde C. R. y Mann K. L. 1999. *Monitoring and verifying soil organic carbon sequestration*. In: N. J. Rosenberg, R. C. Izaurralde y E. L. Malone (Eds), *Carbon Sequestration in Soils: Science, Monitoring, and Beyond*. Proceeding of the St. Michaels Workshop, December 1998. Battelle Press, Columbus, Ohio, pp. 41-66.
- Quantin P., D. Geissert. 1988. *Características químicas y mineralógicas de un Andosol y de un suelo ferralítico de Xalapa, Veracruz, México*. En http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_45-46/010009484.pdf
- Rodeghiero, M, Heinemeyer, A., Bellamy, P. 2010. *Determination of soil carbon stocks and changes*. En: *Soil Carbon Dynamics. An Integrated Methodology*. Kutsch, W. L. Bahn, M. and Heinemeyer, A. Cambridge University Press, UK, 49-75.
- Rodríguez R. A., C. D. Arbelo, J. S. Notario, J. L. Mora, J. A. Guerra, y C.M. Armas. 2004. *Contenido y formas de carbono orgánico en Andosoles forestales*:

aproximación a su dinámica. Edafología. Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Santiago de Compostela, España. Vol. 11. N° 1. pp. 117.

- Rodríguez R., J. Jiménez, A. O. Aguirre, J. E. Treviño. 2006. *Estimación del carbono almacenado en un Bosque de Niebla en Tamaulipas, México.* Ciencia UANL, Vol. IX, No. 2. p. 179-188.
- Rzedowski J., 2006. *Vegetación de México.* Primera Edición digital. CONABIO, México. p. 400.
- Sáenz Peña – Chaco R. 2005. *Procedimientos Analíticos para aguas de riego y consumo animal. Técnicas utilizadas en el laboratorio de suelos y agua.* Estación experimental Agropecuaria INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina. pp. 17.
- Salati, E. 1990. *Los posibles cambios climáticos en América Latina y el Caribe y sus consecuencias.* Report # 90-7-1223, Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y el Caribe- CEPAL. Santiago de Chile, p. 45.
- Santa Regina I., M. Rapp, A. Martín y J.F. Gallardo. 1997. *Nutrient release dynamics in decomposing leaf litter in two Mediterranean deciduous oak species.* Ann. Sci. For. Vol. 54. pp. 747-760. En Pajares S., S. Covalada, J. F. Gallardo, J. D. Etchevers y C. Prat. 2005. Calidad edáfica de dos toposecuencias del Eje Neovolcánico Mejicano. Memorias 5° Congreso Forestal Nacional, Viseu. Portugal. 16 - 19 Mayo de 2005. Actas das Comunicasoes. Sociedade Portuguesa de Ciências Florestais.
- Saray Sánchez, G. Crespo, Marta Hernández y Y. García. 2008. *Factores bióticos y abióticos que influyen en la descomposición de la hojarasca en pastizales.* Pastos y Forrajes, Vol. 31, No. 2, P 99- 118
- Sawyer C. N., P. L. McCarty y G. E. Parkin. 2000. *Química para Ingeniería Ambiental.* 4a Ed. McGraw Hill. Colombia. pp. 713
- Scanlon B., Healy R., Cook P. 2002. *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.* Hydrogeology Journal. Vol.10 N° 1. pp. 18 – 39.
- Schimel, D. S. 1995. *Terrestrial Ecosystems and The Carbon Cycle.* Global Change Biology, vol. 1, p. 77-91.
- Scozzafava, M., Tallini. M. 2001. Net infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. Hydrogeology Journal. Vol. 9. pp. 461 – 475.
- Smith, T. M., W. P. Cramer, R. K. Dixon, R. Leemans, R. P. Neilson, and A. M. Solomon, 1993. *The Global Terrestrial Carbon Cycle.* In Wisniewski, J. y R. N.

Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. p. 19-37.

- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Handbook*. Number 436. US Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- Stein L. M. 1999. Interpolation of spatial data: some theory for kriging. Ed. Springerlink. pp. 243.
- Thompson, S. K. 1992. *Sampling*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Thornthwaite C. W., Mather Jr. 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. En: Grundstein A. 2009. Evaluation of climate change over the continental United States using a moisture index. *Climate Change*. Vol. 93. pp. 103 – 115.
- Thornthwaite C. W., Mather Jr. 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. *Publications in Climatology*. Vol.10 N° 3 pp.183 – 311. Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey, USA.
- UNEP-GEF. 1999. Technical Advisory Panel of the Global Environmental Facility-United Nations Environment Program. Report of Biodiversity Conservation in Managed Forests. México.
- UNEP. 2000. Technical Advisory Panel of the Global Environmental Facility-United Nations Environment Program. Report of Biodiversity Conservation in Managed Forests. México.
- UNEP. 2011. *Keeping Track of Our Changing Environment: From Rio to Rio+20 (1992-2012)*. Division of Early Warning and Assessment (DEWA), United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi
- USDA Soil Conservation Service. 1986. *Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds*. US Department of Agriculture-Soil Conservation Service. Washington, DC, USA. (URL: <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/hydro/hydro-toolsmodels-tr55.html>)
- Valera Pérez, M. A y Saldaña Munive, J.A. 2011. *Región socio económica II Teziutlán, Puebla*. pp 41-43. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) 2011. *La Biodiversidad en Puebla. Estudio de Estado*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 440 páginas.

- Valera Pérez M.A., Linares Fleites G. y Castillo Morales M. 2006. *Evaluación de las características y los procesos que ocurren en los suelos*. En: Memorias del Cuarto Congreso Nacional en Ciencias de la Computación, Puebla, México, pp. 32-36.
- Valera Pérez M. A. 1993. *Fisicoquímica y mineralogía de Andosoles de la Región de Teziutlán, Estado de Puebla*. Tesis de Maestría en Ciencias (Edafología). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vela C. G., Vázquez M. B. E., Rodríguez G. M. de L., Domínguez R. I. V. 2007. Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de *Pinus moctezumae* Lamb. en el Volcán La Malinche, México. *Agrociencia*. Vol. 41. p. 371-383.
- Vitousek, P. M. 1994. *Beyond global warming: ecology and global change*. *Ecology*. vol. 75, no. 7, p. 1861-1876.
- Zimmermann E. 2006. Bayesian approach to daily rainfall modelling to estimate monthly net infiltration using the Thornthwaite water budget and Curve Number methods. *Hydrogeology Journal*. Vol. 14. pp. 648 – 656.
- En la página Web http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/medio_mod1.2.htm
- En la página Web http://www.ciceana.org.mx/recursos/Ciclo_del_carbono.pdf
- En la página Web <http://www.conafor.gob.mx>
- En la página Web <http://www.eambiental.org>
- En la página Web <http://www.jmarcano.com/nociones/bioma/templado.html>
- En la página Web <http://www.libramientoxalapa.org/docu/bosque/bosques.html>

A N E X O S

ANEXO I: Base de Datos 1987

PERFIL	X	Y	ALTITUD (msnm)	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)	FORMACIÓN VEGETAL	PROFUNDIDAD (cm)	HORIZONTE	COLOR SECO
30	668500	2178350	2915	700	Pastizal inducido, Bosque de pino	3	A	2.5YR3/2
						32	B	10YR7/6
35	673250	2176800	2740	700	Pastizal inducido, Bosque de pino	4	A	10YR5/4
						35	B	10YR6/6
36	672500	2176100	2775	700	Pastizal inducido, Bosque de pino	6	A	10YR5/3
						24	B	10YR5/6
41	667000	2181000	2920	700	Pastizal inducido, Bosque de pino	5	A	2.5Y4/4
						35	B	10YR6/6
62	655300	2179650	2940	700	Papa, agricultura de temporal	7.5	A	10YR5/3
						36	B	10YR5/4
63	650100	2178850	2570	700	Trigo, agricultura de temporal	15	A	10YR6/4
						46	C	2.5YR7/4
84	670050	2179750	2740	700	Pastizal inducido, Bosque de pino	10	A	10YR7/4
						31	B	10YR7/6
6	673000	2188700	2115	1200	Maíz, agricultura de temporal	15	A	10YR5/4
						32.5	B	2.5YR6/4
20	667450	2186650	2540	800	Pastizal inducido, Bosque de pino y encino	5	A	2.5Y4/4
						20	B	10YR5/6
87	668850	2185825	2580	800	Pastizal inducido, Bosque de pino y encino	21	A	10YR2/2
						70	B	7.5YR4/6
110	659500	2201200	1540	2000	Bosque Mesófilo de Montaña	20	A	10YR4/2
						73	B	10YR6/6
111	664850	2196150	1940	1200	Bosque Mesófilo de Montaña	33.5	A	10YR3/3
						97	B	10YR5/3
118	651925	2198525	2010	1200	Bosque de pino y encino	5	A	10YR5/4
						17.5	B	10YR5/8
5	680200	2202350	1000	2500	Café y Bosque Mesófilo de Montaña	17.5	A	10YR5/6
						55	B	10YR6/6
9	650500	2200625	2060	1500	Bosque de pino y encino	37.5	A	10YR4/2
						89	B	10YR4/3
11	651500	2210250	1480	2000	Pastizal inducido	13	A	10YR3/2
						51.5	B	10YR5/6
40	672900	2178100	2260	700	Pastizal inducido	13	A	2.5YR4/4
						33	C	2.5YR5/4
44	674000	2197000	1500	2000	Pastizal inducido, Bosque de pino y encino	13.5	A	10YR3/3
						38	C	10YR8/6
82	675200	2183750	2500	1000	Maíz, agricultura de temporal	14.5	A	10YR4.5/3
						45	C	10YR6.5/5
83	675200	2187900	2000	1200	Maíz, agricultura de temporal	15	A	10YR5/3
						17.5	B	10YR6/4
93	662250	2184575	2680	740	Maíz, agricultura de temporal	11	A	10YR4.5/3
						33.5	B	10YR6.5/6

PERFIL	COLOR HÚMEDO	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	TEXTURA	% M.O.	% C ORG.	COS (ton/ha)	% N. Tot.	C/N	% Retención Fosfatos	% Al Extraíble
30	5YR2.5/1	0.61	30.10	42.70	27.20	3	18.10	10.50	19.22	0.81	13.00	46.00	1.17
	10YR4/6	0.78	33.30	41.60	25.10	3	1.20	0.70	17.47	0.06	11.00	50.40	1.51
35	10YR2/2	0.78	34.80	39.10	26.10	3	6.90	4.00	12.48	4.27	15.00	51.50	1.93
	10YR3/6	0.78	43.20	35.60	21.20	3	1.60	0.90	24.57	0.07	12.00	63.20	2.05
36	10YR2/2	0.62	31.00	39.30	29.70	3,1	9.00	5.20	19.34	0.32	16.00	60.90	1.58
	7.5YR3/4	0.80	40.50	32.90	26.60	3	3.10	1.80	34.56	0.14	13.00	57.00	1.32
41	5YR2.5/2	0.71	28.20	40.20	31.60	3,1	7.90	4.60	16.33	0.33	14.00	50.50	1.42
	7.5YR4/6	0.69	35.80	42.30	21.90	3	2.80	1.60	38.64	0.12	13.00	44.00	2.13
62	10YR3/2	0.80	48.30	25.60	26.10	3,1,2	6.40	3.70	22.20	0.25	15.00	61.80	1.05
	7.5YR3/4	0.79	43.80	33.60	22.60	3	4.50	2.60	73.94	0.20	13.00	65.30	1.23
63	10YR3/4	0.87	59.10	25.40	15.50	3,2	2.90	1.70	22.19	0.11	15.00	60.20	1.52
	10YR4/6	0.89	70.70	13.60	15.70	3,2	0.50	0.30	12.28	0.02	17.00	58.00	1.41
84	7.5YR4/4	0.70	35.10	48.60	16.30	3	11.50	6.70	46.90	0.39	17.00	34.90	1.93
	7.5YR4/6	0.63	47.90	26.60	25.50	3,1,2	2.80	1.60	31.25	0.13	12.00	56.70	2.35
6	10YR3/4	0.69	39.10	49.10	11.80	3	6.80	3.90	40.37	0.26	15.00	72.30	1.88
	10YR3/4	0.79	53.70	33.90	12.40	3,2	0.40	0.20	5.14	0.01	13.00	63.40	1.89
20	10YR3/2	0.71	45.40	35.60	19.00	3	9.10	5.30	18.82	0.41	13.00	64.70	1.80
	10YR3/4	0.66	39.00	33.50	27.50	3,1	5.50	3.20	42.24	0.23	14.00	70.40	2.06
87	10YR3/3	0.63	42.10	25.60	32.30	3,1	10.00	5.80	76.73	0.41	14.00	70.00	2.03
	10YR7/6	0.57	41.60	38.30	20.10	3	2.30	1.30	51.87	0.07	18.00	74.00	2.96
110	10YR2/1	0.50	45.70	32.30	22.00	3	12.00	7.00	70.00	0.54	13.00	86.90	3.42
	10YR4/6	0.77	30.20	48.50	21.30	3	0.50	0.30	16.86	0.04	16.00	70.5	2.09
111	10YR2/1	0.69	27.80	34.70	37.50	3,1	12.70	7.40	171.05	0.46	16.00	80.60	3.09
	10YR2/1	0.72	20.30	45.50	34.20	3,1	11.90	6.90	481.90	0.53	13.00	87.20	3.06
118	10YR3/3	0.75	35.30	31.80	32.90	3,1	10.10	5.90	22.13	0.45	13.00	76.20	2.98
	7.5YR3/4	0.64	37.90	22.60	39.50	3,1	4.40	2.50	28.00	0.19	13.00	80.90	3.42
5	10YR3/3	0.80	73.80	16.00	10.20	3,2	7.69	4.46	62.44	0.46	9.69	68.10	1.08
	10YR4/6	0.84	61.10	26.00	12.90	3,2	2.25	1.30	60.06	0.13	10.00	76.50	1.01
9	10YR2/1	0.76	45.84	37.64	16.52	3	13.67	7.92	225.72	0.60	13.20	82.20	3.72
	10YR2/1	0.69	67.84	25.64	6.52	3,2	10.25	5.94	364.78	0.50	11.88	85.90	5.87
11	10YR2/1	0.53	45.80	41.64	12.88	3,2	13.30	7.71	53.12	0.00	7.38	87.90	3.58
	2.5Y3/2	0.66	73.48	23.64	2.88	3,2	5.99	3.47	117.95	0.00	4.35	72.50	3.82
40	10YR2.5/2	0.86	46.20	32.40	21.40	3	4.60	2.70	30.19	0.36	7.38	65.90	1.71
	2.5Y3/2	0.94	66.20	22.70	11.10	3,2	1.50	0.90	27.92	0.20	4.35	67.00	0.86
44	5YR2.5/1	0.60	89.32	9.00	1.68	2	11.26	6.53	52.89	0.45	14.50	63.00	2.28
	10YR5.5/8	0.67	92.80	5.40	1.75	2	8.50	4.93	125.52	0.50	9.86	72.40	2.73
82	10YR3/1	0.75	53.00	34.64	12.36	3,2	13.80	8.00	87.00	0.16	13.30	76.30	2.15
	7.5YR5/7	0.89	56.00	28.64	15.36	3,2	1.30	0.80	32.04	0.09	8.89	78.10	1.82
83	10YR2/1	0.75	45.22	27.28	27.50	2	9.90	5.70	64.13	0.35	14.72	80.70	4.11
	10YR3/3	0.61	50.22	38.28	11.50	3	5.90	3.40	36.30	0.25	13.60	79.60	3.85
93	7.5YR3.5/2	0.78	45.12	30.00	24.88	3	8.10	4.70	40.33	0.35	13.42	81.20	3.74
	7.5YR4/6	0.75	47.12	44.00	8.88	3	2.50	1.40	35.18	0.15	9.33	83.60	3.13

PERFIL	% Fe Extraible	Al + 1/2 Fe extr. (%)	pH (NaF 1N)	pH(2:1 H ₂ O:S)	pH(2:1 KCl:S)	Delta pH	CIC(cmol(+)/Kg S)	%V	Ca	Mg	Na	K
30	0.35	1.34	9.20	6.00	5.20	-0.80	19.40	29.40	3.30	1.60	0.20	0.60
	0.53	1.77	9.40	6.90	6.20	-0.70	15.10	40.40	2.50	1.40	0.70	1.50
35	0.60	2.23	9.40	5.10	4.40	-0.70	13.55	36.90	2.90	1.10	0.40	0.60
	0.60	2.35	10.50	7.00	6.50	-0.50	14.85	36.40	3.30	1.40	0.30	0.40
36	0.44	1.80	10.30	6.50	5.80	-0.70	19.25	54.50	5.40	2.80	0.90	1.40
	0.32	1.48	10.80	7.00	6.20	-0.80	13.25	45.28	2.80	10.00	0.80	1.40
41	0.28	1.56	9.80	5.30	4.50	-0.80	13.20	47.00	3.00	2.30	0.40	0.50
	0.25	2.26	10.00	5.90	5.20	-0.70	12.80	36.70	2.40	1.50	0.60	0.20
62	0.37	1.23	9.50	5.00	4.40	-0.60	16.40	28.40	3.40	0.60	0.40	0.50
	0.34	1.40	9.80	6.00	5.30	-0.70	15.00	29.80	4.00	1.00	0.40	0.50
63	0.30	1.67	9.00	6.00	5.10	-0.90	21.40	31.30	3.40	0.90	1.40	1.00
	0.22	1.52	9.20	6.00	5.20	-0.80	14.30	29.30	2.00	0.60	0.90	0.60
84	0.35	2.10	10.20	5.90	5.30	-0.60	33.00	10.60	2.30	0.50	0.40	0.30
	0.66	2.68	11.20	6.10	5.40	-0.70	30.70	10.20	1.50	1.00	0.50	0.10
6	0.65	2.20	10.50	5.00	4.20	-0.80	21.30	30.00	3.00	2.00	0.80	0.60
	0.21	1.99	10.00	6.00	5.20	-0.80	25.00	32.80	5.00	2.00	0.60	1.60
20	0.49	2.04	10.60	5.40	4.70	-0.70	19.40	19.80	2.00	1.00	0.35	0.50
	0.27	2.20	10.80	5.60	4.90	-0.70	14.30	22.40	1.50	1.00	0.40	0.30
87	0.34	2.20	10.80	5.30	4.80	-0.50	34.60	14.20	3.50	1.00	0.20	0.10
	0.66	3.30	9.50	6.20	5.70	-0.50	29.00	6.70	1.30	0.20	0.30	0.10
110	1.80	4.32	11.50	4.80	4.00	-0.80	35.80	27.40	5.60	1.40	2.00	0.80
	0.91	2.54	10.8	4.40	5.40	-1.00	10.50	40.90	2.00	0.80	1.20	0.30
111	1.25	3.72	10.30	5.10	4.50	-0.60	16.80	50.60	4.10	1.30	2.80	0.30
	1.96	4.04	10.80	5.40	4.70	-0.70	13.80	38.30	4.30	0.70	0.20	0.20
118	0.94	3.45	10.70	6.00	5.40	-0.60	34.20	55.70	9.70	3.10	2.20	4.00
	1.00	3.92	10.70	6.30	5.60	-0.70	33.70	30.10	6.50	1.20	0.70	1.70
5	1.02	1.60	48.75	5.40	4.40	-1.00	30.50	10.59	1.06	0.21	1.60	0.30
	0.45	1.23	36.75	5.30	4.40	-0.90	31.80	8.89	1.00	0.06	1.40	0.40
9	0.50	3.97	35.50	5.10	4.80	-0.30	41.10	17.00	1.90	0.20	1.67	0.30
	0.90	6.32	58.75	6.30	5.00	-1.30	53.30	8.33	0.28	0.28	1.76	0.30
11	0.67	3.92	49.50	5.00	4.10	-0.90	29.10	4.73	0.84	0.21	0.62	0.08
	0.35	4.00	67.75	5.00	4.40	-0.60	38.50	5.11	0.42	0.22	1.10	0.23
40	0.25	1.83	46.50	6.80	5.30	-1.50	11.05	43.50	2.70	1.30	0.40	0.31
	0.15	0.93	40.25	7.40	5.50	-1.90	10.35	47.50	1.80	1.70	0.56	0.30
44	0.52	2.54	53.25	5.30	4.40	-0.90	29.00	32.70	5.00	3.00	0.60	0.60
	0.40	2.93	54.50	5.90	4.70	-1.20	18.50	48.30	5.60	1.50	0.70	0.45
82	0.36	2.33	29.50	6.50	4.70	-1.80	48.40	9.30	3.00	1.20	0.18	0.14
	0.83	2.24	44.00	6.00	4.30	-1.70	53.20	8.80	3.00	1.00	0.31	0.38
83	0.55	4.38	23.00	5.50	5.10	-0.40	44.20	12.00	4.00	1.00	0.20	0.13
	0.55	4.125	43.25	5.70	5.60	-0.10	39.90	10.20	2.10	1.60	0.20	0.16
93	1.60	4.54	34.50	5.80	4.80	-1.00	27.30	13.47	2.00	1.00	0.37	0.31
	1.90	5.08	41.25	6.10	5.20	-0.90	29.00	10.30	1.60	0.70	0.37	0.31

ANEXO II: Análisis de normalidad del COS

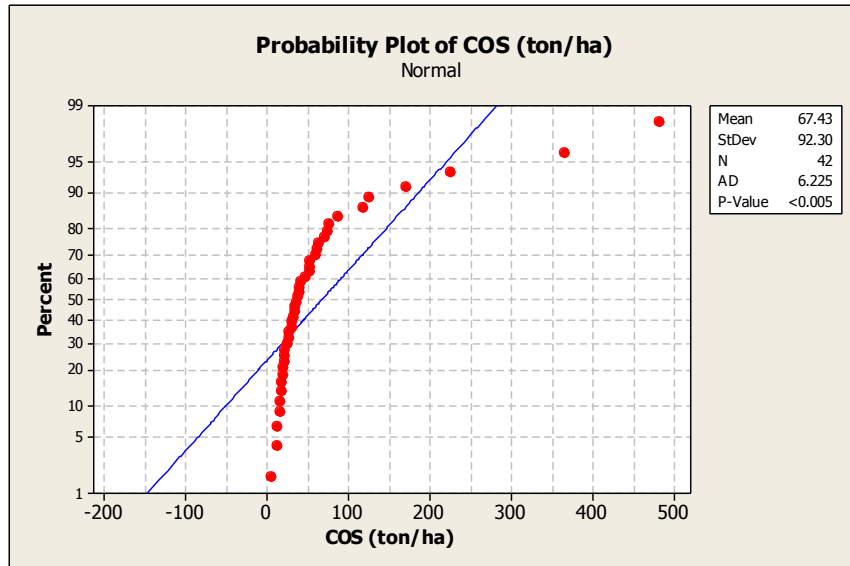


Fig. I. Gráfico de Probabilidad de COS (ton/ha)

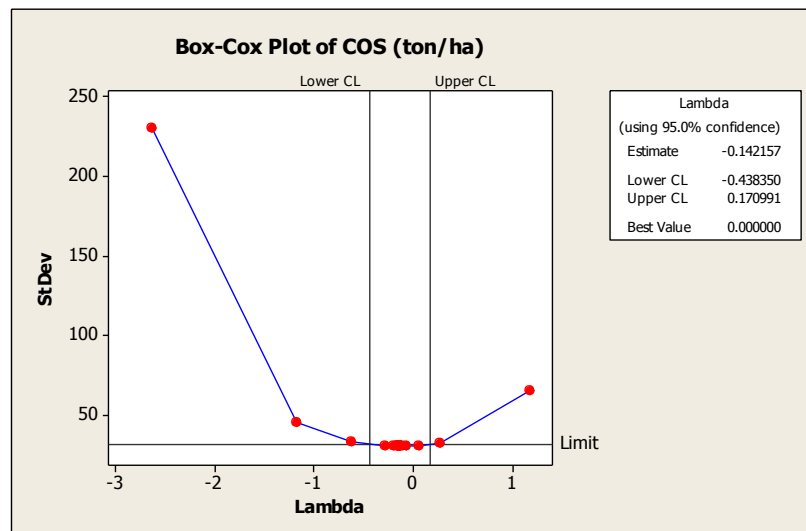


Fig. II. Gráfico de Transformada Box-Cox de COS (ton/ha)

Cuadro. I. Estadísticas descriptivas: COS transformada

Variable	Individuos	Media	Des. Est.	C.V.	Mín.	Media	Max.
COS trans	42	3.731	0.907	24.32	1.637	3.623	6.178

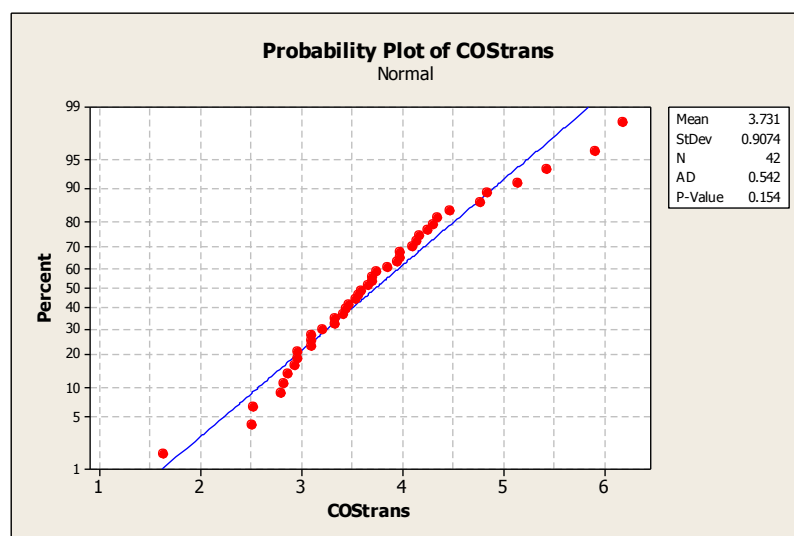


Fig. III. Gráfico de Probabilidad de COS (ton/ha)

ANEXO III: Regresión PLS

Cuadro. II. Selección de Modelo y validación para % CO

X Varianza	Error ME	R²	PRESS
0.190745	178.600	0.364160	397.3
	146.631	0.477973	829.0
	128.287	0.543283	1168.6
	117.105	0.583093	1409.5
	111.247	0.603946	1538.9
	107.838	0.616082	1585.9
	104.731	0.627146	1634.4
	102.099	0.636513	1732.5
	100.800	0.641139	1798.9
	99.000	0.647546	1819.2
	98.055	0.650912	1735.3
	97.585	0.652586	1748.3
	97.231	0.653844	1704.5
	96.838	0.655244	1707.1
	96.522	0.656371	1728.2
	96.393	0.656829	1743.2
	96.231	0.657405	1768.4
	96.039	0.658090	1749.3
	95.907	0.658558	1765.3
	95.594	0.659675	1795.8
	95.401	0.660359	1773.8
	95.331	0.660611	36290.1

Cuadro. III. Análisis de varianza para %CO

Fuente	Grados de Libertas (GL)	Muestras Estandarizadas (ME)	Media Muestral (MM)	Est. F	Valor - p
Regresión (R)	1	102.288	102.288	22.91	0.000
Error residual (ER)		178.600		4.465	
Total		280.889			

Cuadro. IV. Coeficientes de la Regresión PLS

	% C Org.	% C Org. estandarizado
Constante	8.94761	0.000000
Altitud	-0.00022	-0.046034
Precipitación media anual	0.00027	0.055985
Profundidad	-0.00920	-0.079209
Densidad Aparente	-3.82493	-0.145212
% Arena	-0.00604	-0.036958
% Limo	0.00703	0.027331
% Arcilla	0.00919	0.033371
% N. Tot.	0.26946	0.066509
C/N	0.03216	0.037656
% Retención Fosfatos	0.01075	0.052602
% Al Extraible	0.22787	0.093271
% Fe Extraible	0.30609	0.053888
pH (NaF 1N)	0.00451	0.031138
Ah	-0.38042	-0.097333
Ai	-0.55039	-0.124115
Delta pH	0.21924	0.030750
CIC	0.01822	0.083578
%V	-0.00401	-0.023616
Ca	0.08439	0.058413
Mg	-0.03468	-0.020522
Na	0.19540	0.046049
K	-0.06761	-0.017732

Cuadro. V. Cargas de los predictores X

	Componente 1
Altitud	-0.274516
Precipitación media anual	0.289026
Profundidad	0.001037
Densidad Aparente	-0.347138
% Arena	-0.021549
% Limo	0.028962
% Arcilla	0.006067
% N. Tot.	0.111508
C/N	0.060961
% Retención Fosfatos	0.322974
% Al Extraible	0.375552
% Fe Extraible	0.296501
pH (NaF 1N)	0.125081
Ah	-0.375159
Ai	-0.323236
Delta pH	0.164432
CIC	0.285262
%V	-0.188625
Ca	0.072935
Mg	-0.164258
Na	0.189085
K	-0.040013

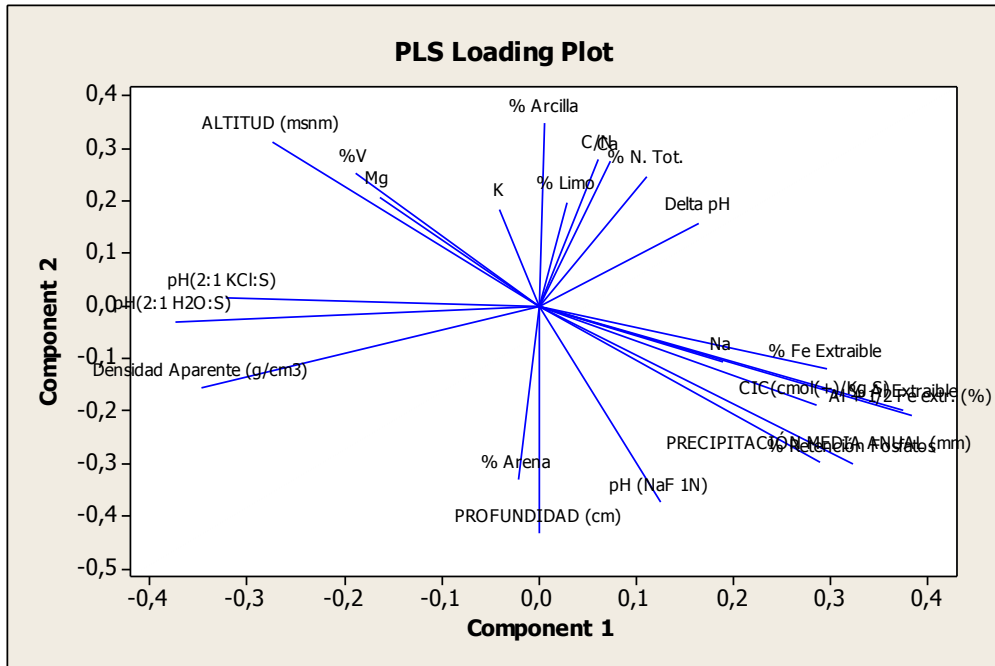


Fig. III. Gráfico de cargas PLS

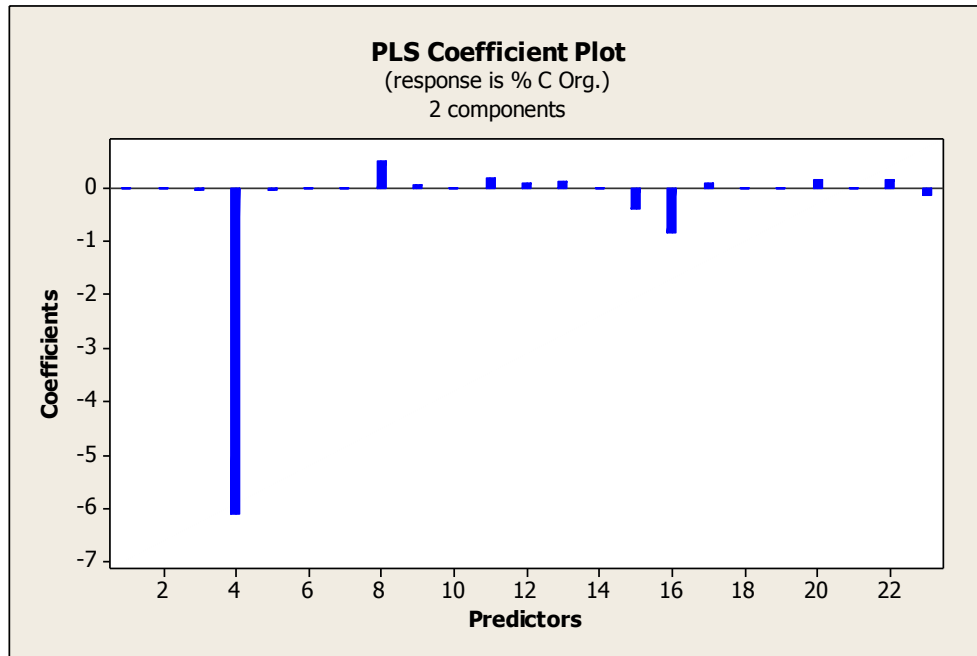


Fig. IV. Gráfico de coeficientes PLS

ANEXO IV: Análisis comparativo de COS

Cuadro.VI. Características generales de los sitios de bosque estudiado

Características	Teziutlán, México		Navasfrías, España
Coordenadas	19° 46' 23'' N, 97° 09' 17'' O a 20° 11' 55'' N, 97° 38' 36'' O		40° 02' N, 0 3° 0' O
Altitud	1200 -1800	>1800	960
Temperatura (°C)	12 – 18	12 – 18	11
Precipitación (mm)	200 - 1800	>200	1580
Tipo de vegetación	Bosque Mesófilo de Montaña	Bosque de Pino - Encino	Bosque templado caducifolio dominado por quercus pyrenaica
Edad del Bioma característico (años)	80	80	80
Tipo de suelo	Andisol	Andisol	Umbrisol órtico
Textura de horizontes (%)	43 arena, 34 limo, 23 arcilla	48 arena, 32 limo, 19 arcilla	22 arena, 38 limo y 21 arcillas
Densidad aparente del horizonte (gcm ⁻³)	0.72	0.72	0.8
pH de los horizontes (H ₂ O)	4.4 - 5.4	5.0 -7.4	4.9 – 5.1
% C orgánico	3.84	4.56	0.68
Profundidad de estudio (cm)	3 – 55	3 - 55	0 - 20

Cuadro. VI. Continuación

Características	Almadén, Ciudad Real	El Bonillo, Albacete	Mirabueno, Guadalajara	Almorox, Toledo	Viñuelas, Guadalajara
Coordenadas	38° 45' 4'' N, 04° 32' 02'' O	38° 56' 24'' N, 02° 33' 48'' O	40° 56' 5'' N, 02° 44' 51'' W	40° 15' 57'' N, 04° 22' 11'' O	40° 47' 28'' N, 03° 20' 57'' O
Altitud	562	980	1076	618	859
Temperatura (°C)	12.7	11.6	9.4	8.4	8.9
Precipitación (mm)	475	547	617	597	627
Tipo de vegetación	Encinar	Encinar	Robledal	Pinar	Encinar
Edad del Bioma característico (años)	30	100	100	40	50
Tipo de suelo	Acrisol	Luvisol	Luvisol	Cambisol	Acrisol
Textura de horizontes (%)	12% arcilla	26% arcilla	32% arcilla	8% arcilla	12% arcilla
Densidad aparente del horizonte (gcm ⁻³)	1.4	1.6	1.2	1.2	1.5
pH de los horizontes (H ₂ O)	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
% C orgánico	2.5	5.8	4.8	3.7	5.5
Profundidad de estudio (cm)	0 -45	0 - 14	0 - 36	0 - 18	0 - 14

Cuadro. VII. Características generales de los sitios de bosque estudiado

Sitio	Teziutlán,		Navasfrías, España	Almadén, Ciudad Real	El Bonillo, Albacete	Mirabueno, Guadalajara	Almorox, Toledo	Viñuelas, Guadalajara
Almacén	BMM	BPE	BT	BE1	BE2	BR	BP	BE3
Contenido de Carbono Orgánico								
COS(ton/ha)	143.7	54.7	103	157.5	55.68	161.28	79.92	115.5

Cuadro .VIII. Valores de la prueba t-student y p-values correspondientes a la comparación de los COS BMM vs los demás grupos

	Navarrasfrías, España	Almadén, Ciudad Real	El Bonillo, Albacete	Mirabueno, Guadalajara	Almorox, Toledo	Viñuelas, Guadalajara
t	0.58	-0.19	1.24	-0.25	0.90	0.40
p-value	0.590	0.853	0.269	0.814	0.409	0.707

Cuadro. IX. Valores de la prueba t-student y p-values correspondientes a la comparación de las medias de COS BPE vs los demás grupos

	Navarrasfrías, España	Almadén, Ciudad Real	El Bonillo, Albacete	Mirabueno, Guadalajara	Almorox, Toledo	Viñuelas, Guadalajara
t	-4.31	-9.17	-0.09	-0.951	-2.25	-5.42
p-value	0.00	0.00	0.932	0.00	0.031	0.00

Cuadro. X. Información obtenida de la comparación de las medias de COS de BPE

	N	Media	Desv. Stand.	Media Error²
COS BPE	36	54.7	67.3	11
COS BMM	6	144	173	71

ANEXO V: Gráficos de los residuos para el modelo de regresión

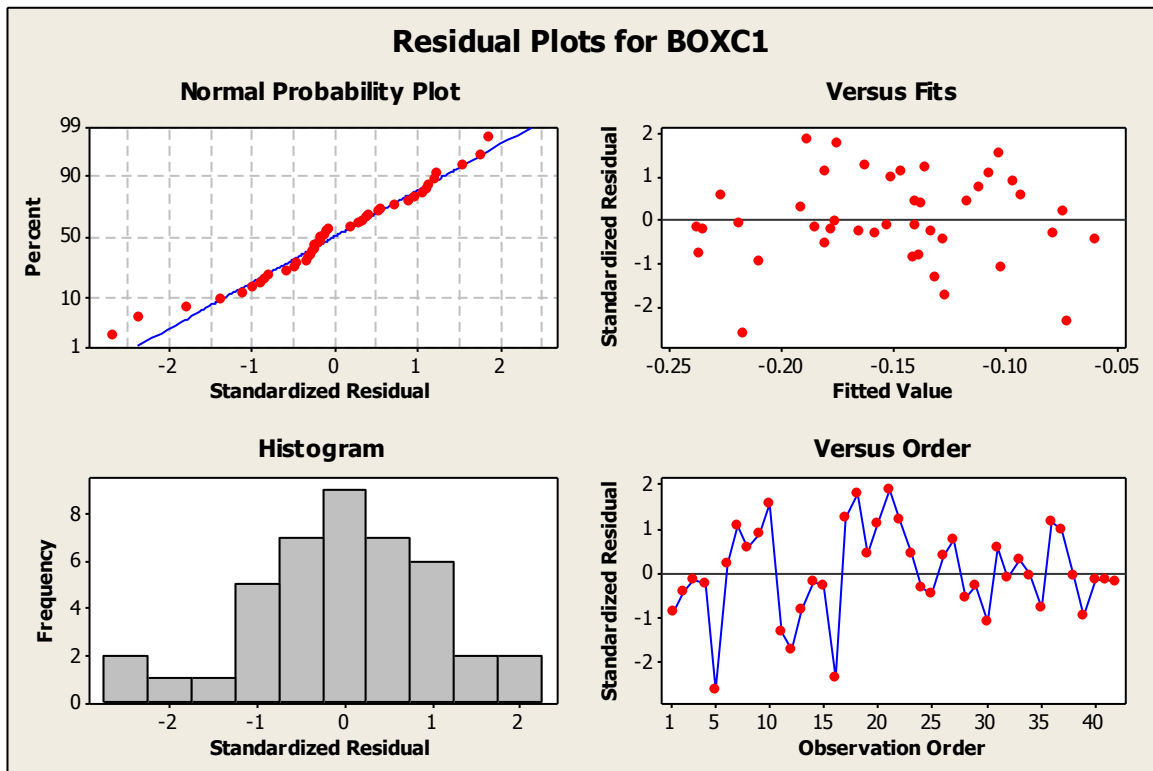


Fig. V. Gráfico Residual para $\ln \text{COS}$

ANEXO VI: Comparación de la distribución espacial de los COS con isotermas e isoyetas

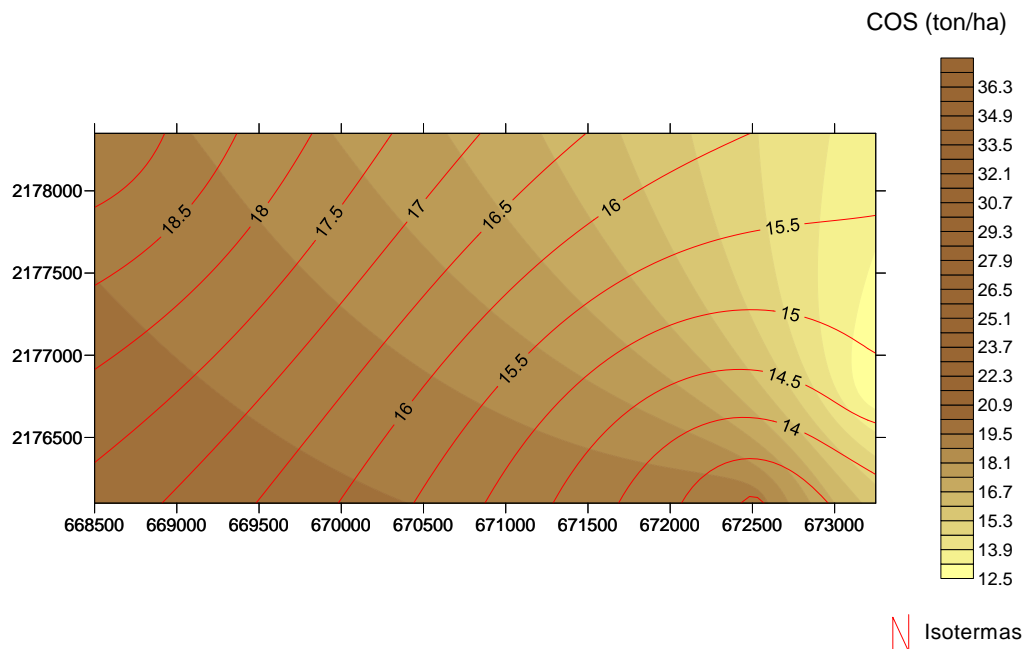


Fig. VI. Gráfico de la distribución del COS con las isotermas 1987

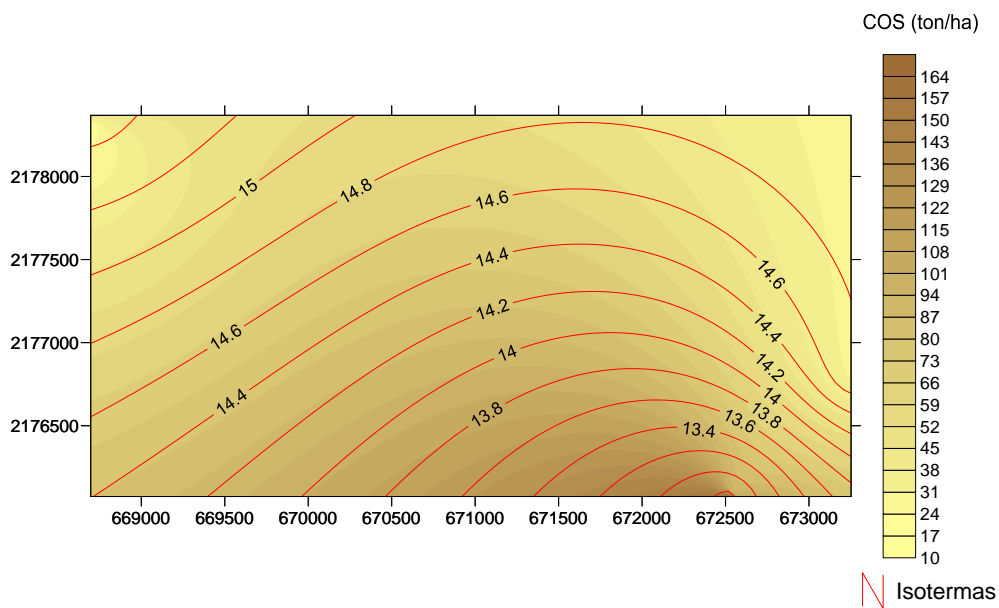


Fig. VII. Gráfico de la distribución del COS con las isotermas 2009

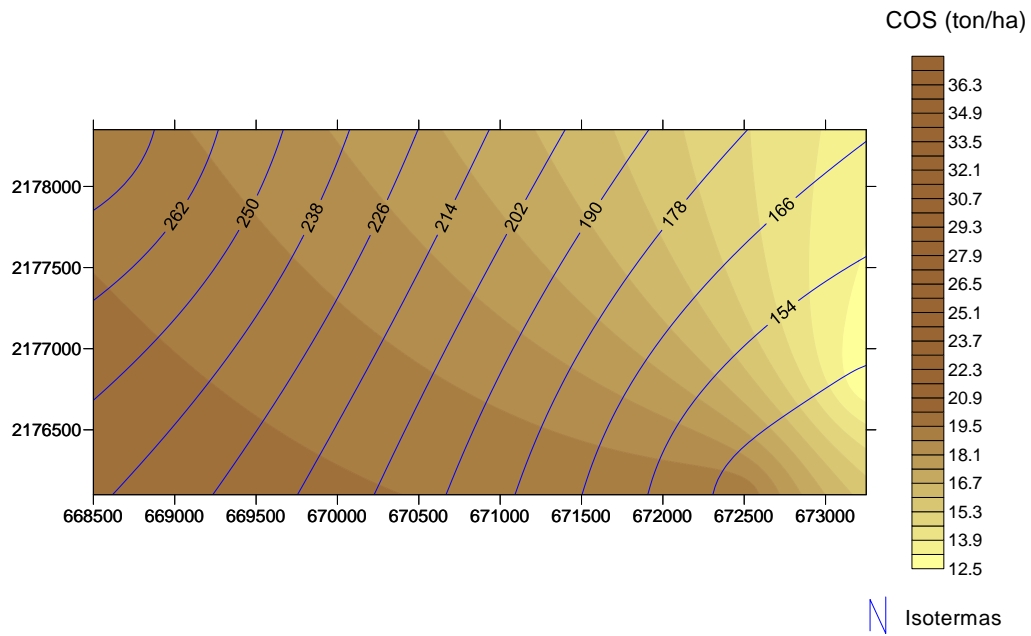


Fig. VIII. Gráfico de la distribución del COS con las isoyetas 1987

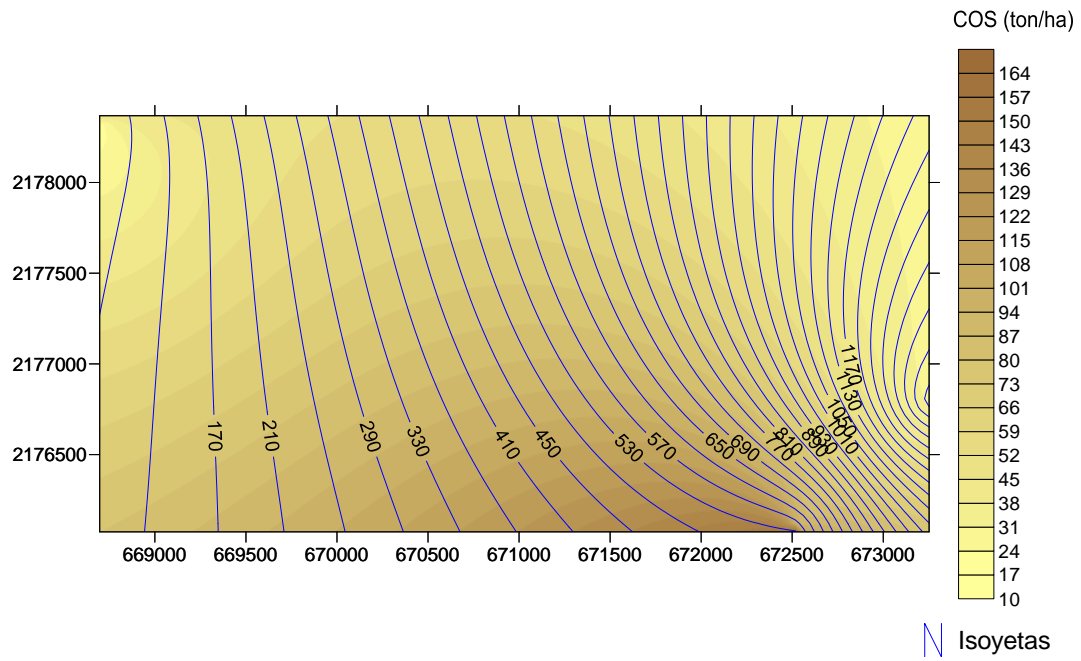


Fig. IX. Gráfico de la distribución del COS con las isoyetas 2009